

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Spektrální charakteristiky dělicích poměrů
vláknově optických děličů

Spectral characteristics of fiber splitter dividing
ratios

2010

Bc. Jiří Blaženec

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 7. 5. 2010

.....

Bc. Blaženec Jiří

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc. za cenné rady, podporu a odborné vedení při sestavování této práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá měřením spektrálních charakteristik základních parametrů vláknově optických děličů. Popisuje historii vláknové optiky, základní vlastnosti optických prvků a důležité obecné pojmy optických komunikací. Věnuje se vlastnostem optických vazebních členů a jednotlivým typům. Dále popisuje parametry vazebních členů, jako jsou ztráty (vložené ztráty, směrovost, homogenita ztrát, atd.). Následně je věnována pozornost principu činnosti vláknově optických děličů pro WDM. Zde je popsán úvod do technologie WDM a typy WDM. Příklad funkce WDM vazebního členu, technologie výroby a WDM multiplexery a demultiplexery. V neposlední řadě je realizace měřících sestav pro měření základních parametrů vláknových děličů, která je rozdělena do dvou částí. Cílem této práce jsou vlastní spektrální charakteristiky pro čtyři různé vláknové děliče, měřené na širokém rozsahu vlnových délek.

Klíčová slova

Optické vlákno, WDM, optické vazební členy, přenosová rychlost, slučovač, dělič, vlnová délka, vazební poměr, celkové ztráty, vložené ztráty, směrovost, homogenita ztrát, útlum zpětného odrazu, PDL, izolace, vlnový multiplex, multiplexer, demultiplexer, jednomódové (SM) vlákno, vazební koeficient, délka vazební oblasti, optický výkon, FBT vláknový vazební člen, monochromátor, měřící sestavy, zdroj, spektrometr, měřič vlnových délek, spektrální charakteristiky.

Abstract

This diploma thesis deals with the measurement of the spectral characteristics of fiber splitters. It describes the history of the fibre optics, basic characteristics of optical devices and important general terms of the optical communication. It is aimed at features of the optical fibre couplers and particular types. Describe characteristics of couplers such as losses (insertion loss, directivity, uniformity, etc.). Consequently is attention devoted to working principles of the WDM couplers. Describe introduction to the WDM technology and types of the WDM. The example of working principles, fabrication of fused fiber directional coupler and WDM multiplexers and demultiplexers. The important part of the thesis is realization of the measuring set for a measure of spectral characteristics of fiber splitters, which is divided into two parts. The goal of the thesis is spectral characteristics for four different couplers measured for wideband of wavelengths.

Key words

Optical fiber, WDM, fiber optic couplers, bit rate, coupler, splitter, wavelength, coupling ratio, excess loss, insertion loss, directivity, uniformity, return loss, PDL, isolation, wavelength multiplex, multiplexer, demultiplexer, single-mode (SM) fiber, coupling coefficient, coupling length, optical power, FBT fused fiber coupler, monochromator, measuring set, light source, spectrometer, Wavemeter, spectral characteristics.

Seznam použitých symbolů a zkratek

CATV	(Cable Television) - kabelová televize
CCD	(Charge-Coupled Device) - obrazový senzor
CWDM	(Coarse Wavelength Division Multiplexing) - hrubý vlnový multiplex
DEMUX	demultiplexer
DWDM	(Dense Wavelength Division Multiplexing) - hustý vlnový multiplex
EDFA	(Erbium-doped Fiber Amplifier) - erbiem dopovaný vláknový zesilovač
FBT	(Fused Biconical Taper) - technologie výroby vláknového vazebního členu
FTTH	(Fiber-To-The-Home) - vlákno až do domu
HDTV	(High-Definition Television) - televize ve vysokém rozlišení
LAN	(Local Area Network) - lokální síť, místní síť
LD	(Laser Diode) - Laserová dioda
LED	(Light-Emitting Diode) - světlo vyzařující dioda
LS-I-CAL	Halogenový kalibrováný zdroj
MM	(Multi Mode) - mnoho-módové (vlákno)
MUX	multiplexer
NA	numerická apertura
Např.	například
NEXT	(Near-End Crosstalk) - přeslech na blízkém konci
NWDM	úzko-pásmový multiplexer
Obr.	obrázek
PC	(Personal Computer) - osobní počítač
PON	(Passive Optical Network) - pasivní optická síť
SM	(Single Mode) - jedno-módové (vlákno)
SMA-FC	převodník mezi konektorem typu SMA a FC
USB	(Universal Serial Bus) - univerzální sériová sběrnice
WDM	(Wavelength Division Multiplexing) - vlnový multiplex
WWDM	(Wide Wavelength Division Multiplexing) - široký vlnový multiplex
cca	(circa) - asi, přibližně, kolem
resp.	(respektive) - popřípadě, vlastně
tzv.	takzvaně
viz	(videre licet) - lze vidět
λ	(délka vlny) - vlnová délka [m]

OBSAH

1. ÚVOD	1
1.1. OPTICKÉ KOMUNIKACE.....	2
1.2. HISTORIE	2
2. OPTICKÉ VAZEBNÍ ČLENY	5
2.1. OPTICKÉ PRVKY.....	5
2.2. VLASTNOSTI OPTICKÝCH VAZEBNÍCH ČLENŮ	6
2.3. TYPY VAZEBNÍCH ČLENŮ	6
2.4. PARAMETRY VAZEBNÍCH ČLENŮ.....	7
2.4.1. Vazební poměr (<i>Coupling ratio</i>)	8
2.4.2. Vazební tolerance (<i>Coupling tolerance</i>).....	8
2.4.3. Vazební ztráty (<i>Coupling loss</i>).....	8
2.5. OZNAČOVÁNÍ ZTRÁT	9
2.5.1. Celkové ztráty (<i>Excess loss</i>).....	10
2.5.2. Vložné ztráty (<i>Insertion loss</i>)	10
2.5.3. Směrovost (<i>Directivity</i>).....	11
2.5.4. Homogenita ztrát (<i>Uniformity</i>)	12
2.5.5. Útlum zpětného odrazu (<i>Return loss</i>).....	13
2.5.6. Polarizačně závislé ztráty (<i>PDL</i>)	13
2.5.7. Izolace – spektrální přeslech.....	14
3. PRINCIP ČINNOSTI VLÁKNOVĚ OPTICKÝCH DĚLIČŮ PRO WDM.....	15
3.1. ÚVOD DO WDM	15
3.1.1. WDM.....	16
3.1.2. WWDM.....	16
3.1.3. DWDM.....	17
3.1.4. CWDM	17
3.2. ZÁVISLOST NA VLNOVÉ DÉLCE	18
3.3. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI VLÁKNOVÉHO VAZEBNÍHO ČLENU	19
3.4. POPIS FUNKCE WDM VAZEBNÍHO ČLENU	24
3.5. TECHNOLOGIE VÝROBY VAZEBNÍCH ČLENŮ PRO WDM.....	29
3.5.1. Výroba.....	30
3.6. WDM MULTIPLEXERY A DEMULTIPLEXERY	32
4. REALIZACE MĚŘICÍCH SESTAV PRO MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ VLÁKNOVÝCH DĚLIČŮ	34
4.1. REALIZACE MĚŘICÍCH SESTAV 1. ČÁST	35
4.2. REALIZACE MĚŘICÍCH SESTAV 2. ČÁST	36
4.3. TYPY POUŽITÝCH DĚLIČŮ	38

5. SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKY 1. ČÁST	40
5.1. DĚLIČ SFT-S035-1x02-50-CM1-SPC-SPC	41
5.1.1. Vzor výpočtu pro první dělič SFT-S035-1x02-50.....	46
5.1.2. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x02-50-CM1-SPC-SPC.....	47
5.2. DĚLIČ SFT-S035-1x02-30-CM1-SPC-SPC	48
5.2.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x02-30-CM1-SPC-SPC.....	52
5.3. DĚLIČ SFT-S035-1x02-10-CM1-SPC-SPC	53
5.3.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x02-10-CM1-SPC-SPC.....	57
5.4. DĚLIČ SFT-S035-1x04-25-CM3-SPC-SPC	58
5.4.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x04-25-CM3-SPC-SPC.....	63
 6. SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKY 2. ČÁST	65
6.1. DĚLIČ SFT-S035-1x02-50-CM1-SPC-SPC	66
6.1.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x02-50-CM1-SPC-SPC.....	69
6.2. DĚLIČ SFT-S035-1x02-30-CM1-SPC-SPC	70
6.2.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x02-30-CM1-SPC-SPC.....	72
6.3. DĚLIČ SFT-S035-1x02-10-CM1-SPC-SPC	73
6.3.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x02-10-CM1-SPC-SPC.....	75
6.4. DĚLIČ SFT-S035-1x04-25-CM3-SPC-SPC	76
6.4.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x04-25-CM3-SPC-SPC.....	78
 7. ZÁVĚR.....	79
 LITERATURA.....	I
SEZNAM PŘÍLOH	VI

1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá měřením spektrálních charakteristik základních parametrů vláknově optických děličů pro široký rozsah vlnových délek.

Vláknově optický dělič (vazební člen) je optický prvek sloužící k rozdělení optického signálu z jednoho optického vlákna do více optických vláken a naopak. Tímto způsobem lze znásobit kapacity již existujících optických tras. Využívá se jako jeden ze základních stavebních prvků při budování optických sítí s vlnovým multiplexem (WDM). Má největší využití v telekomunikacích, LAN sítích, pasivních optických sítích PON, ale najdeme jej i v dalších aplikacích, které využívají jeho specifických vlastností. Jako jsou celo-optické (all-optical switches) spínače, optických vláknové zesilovače EDFA [18], CATV [19] a také při testování nejrozumnějších optických komponentů, kdy potřebujeme slučovat nebo rozdělovat optický signál.

Vlastním principem činnosti vláknově optických děličů pro WDM se zabývám v samostatné podkapitole č. 3 s názvem „Princip činnosti vláknově optických děličů pro WDM“.

V této práci je dále popsána realizace měřicích sestav pro měření základních parametrů vláknových děličů a jsou zde uvedeny všechny podstatné výsledky měření spektrálních charakteristik vláknově optických děličů pomocí spektrometru a měřiče vlnových délek.

Nedílnou součástí je technická dokumentace k jednotlivým optickým prvkům poskytnutá přímo jejich výrobcem. Veškerou technickou dokumentaci jsem uvedl do příloh a v případě potřeby je zde možné najít všechny další podrobné informace.

Jelikož je tato diplomová práce do jisté míry spjata s optickými vlákny, rozhodl jsem se v úvodní kapitole nastínit některé významné milníky z historie vláknové optiky, důležité základní údaje a její budoucí vývoj. Dále jsem popsal princip činnosti WDM technologie, výrobu vláknově optických děličů pro WDM a uvedl další důležité pojmy související s touto problematikou.

1.1. Optické komunikace

V poslední době se setkáváme s obrovským rozvojem komunikačních technologií, internetu a multimédií. Doslova každým dnem rostou požadavky na přenosovou kapacitu komunikačních tras. Tento silný rozvoj přitom do značné míry vděčí za svůj vznik optickým komunikačním sítím, bez kterých by nebylo možné dosáhnout takových rychlostí přenosů dat, které nyní potřebujeme a využíváme.

Základním stavebním prvkem jsou optická vlákna. Což je vlnovod ze skla, křemene nebo ve speciálních případech z průhledného plastu, ve kterém se šíří světelné záření. Během několika minulých desetiletí mělo velké snížení útlumu optických vláken spolu s novými technologiemi, jak v oblasti světelných zdrojů, tak detektorů za následek značný rozvoj vláknově optického průmyslu. Širokopásmové optické zesilovače společně s vlnovými multiplexy (WDM) způsobily převrat ve vláknové optice a umožnily tak vznik vysokorychlostnímu přenosu dat.

1.2. Historie

Angličan profesor fyziky John Tyndall kolem roku 1850 prováděl jedny z prvních pokusů s vedením slunečního světla trubicí s vodou. Na podobném principu pracují dnes používaná optická vlákna.

V roce 1905 Albert Einstein s využitím M. Planckovy hypotézy o kvantové povaze světla vysvětlil princip vnějšího fotoelektrického jevu a získal za něj v roce 1921 Nobelovu cenu. Tím nejen položil základy mnoha vynálezů, ale také změnil pohled na fyzikální principy, které později dali vzniknout prvním zdrojům optického záření. Avšak to byl pouze začátek dlouhé cesty k uskutečnění komunikace pomocí optických vláken.

Fyzik Narinder Singh Kapany v roce 1952 provádí první pokusy, které vedou k vynálezu optického vlákna. Tento muž je se svou více než stovkou patentů, z oblasti vláknově-optické komunikace, laserů, biomedicíny, sluneční energie a dalších dodnes považován za „otce“ optických vláken. Vlákna však měla velký útlum a pro telekomunikační účely byla zcela nepoužitelná.

Skleněná optická vlákna blízka jejich dnešní podobě však vznikla ještě později. V roce 1965, Charles K. Kao a George A. Hockham z britské společnosti Standard Telephones and Cables tvrdili, že útlum používaných vláken je zapříčiněn nečistotami, které je možné částečně odstranit. Zjistili, že vlákno bude možné využít v telekomunikacích, pokud se podaří jeho útlum snížit na 20 dB.km^{-1} [1]. Za tento objev obdržel také Ch. K. Kao v roce 2009 Nobelovu cenu za fyziku [2]. Toho se poprvé podařilo dosáhnout v roce 1970 americké firmě Corning Inc., když demonstrovala vlákno s útlumem 17 dB.km^{-1} , které vzniklo dopováním křemenného skla titanem. To byl zlomový okamžik, který umožnil obrovský rozvoj optických vláken v telekomunikační technice. O několik let poté se podařilo vyrobit vlákno s útlumem 4 dB.km^{-1} jehož jádro už bylo dopováno germaniem, jako je tomu u většiny dnešních vláken [3]. Útlumy optických vláken se od té doby pořád zmenšovaly, až dosáhly dnešních hodnot, kdy se nám běžně daří vyrábět vlákna s útlumem pod $0,2 \text{ dB.km}^{-1}$, mají téměř nulovou disperzi a dokážou běžně překlenout stovky kilometrů.

Vývoj zdrojů záření byl dalším důležitým krokem pro lepší využití optických vláken. V dnešní době jsou nejpoužívanější elektroluminiscenční diody (LED) nebo polovodičové lasery (LD). Lasery prošly přes několik generací od rubínového laseru v roce 1960, helium-neonového laseru až po polovodičové lasery. Výhodou laserů je možnost neobyčejně vysoké frekvenční modulace – jsou dosahovány vysoké frekvence (THz), což je významné pro přenos informace. Dalšími výhodami LED a LD je jejich kompaktnost, miniaturnost, cena, spektrální proměnlivost a relativní rychlost.

Doslova revolucí však bylo komerční využití technologií DWDM. Základní princip DWDM je přitom poměrně prostý. Využívá několika spojených laserů, které do optického vlákna vysílají najednou na různých vlnových délkách. Tím je vytvořeno až několik desítek přenosových kanálů. Úměrně tomu vzroste i objem přenášených dat. Obrovskou výhodou této technologie je využití stávajících optických kabelů.

Ještě však zůstává dostatek prostoru pro další vývoj a skutečná hranice možností je podle odborníků až u rychlostí padesátkrát vyšších (teoreticky skoro neomezených) než jaké se nyní používají v nejmodernějších komerčně využívaných řešeních. To tedy znamená, že přenosová rychlost optického páru by mohla činit až stovky Tbit.s^{-1} .

Tyto převratné rychlosti s sebou přinášejí nové možnosti využití nejen internetu ale i dalších komunikačních technologií. Dnešní trendy se ubírají směrem známým jako FTTH respektive vlákno až do domu. Je tím myšleno propojení poskytovatele služeb pomocí optického vlákna přímo s domácností koncového uživatele. Tím by bylo umožněno využívat mnoha služeb např. video on demand (video na požádání), HDTV, vysokorychlostní internet, virtuální nakupování a další nové technologie požadující maximální přenosové rychlosti. V neposlední řadě nachází optická vlákna uplatnění i v medicíně a postupně s novými technologiemi se jejich využití rozšiřuje i do dalších oblastí.

Základní fyzikální princip činnosti, druhy a vlastnosti optických vláken jsou důkladně popsány v mnoha literaturách a není tedy nezbytně nutné je zde dále rozvádět.

2. Optické vazební členy

Jelikož tato práce úzce souvisí s vláknově optickými děliči, jsou v následující kapitole detailně popsány jejich vlastnosti.

2.1. Optické prvky

Jak jsem v úvodu naznačil, zvyšující se nasazování optických vláken v telekomunikacích a dalších oblastech, jako např. různé senzory, snímače apod., má za následek rostoucí poptávku po kvalitních optických prvcích. Tyto prvky hrají důležitou roli v mnoha vláknově optických aplikacích a vykonávají nejrůznější funkce např. modulace, rozdělování signálu, slučování, filtrování atd.

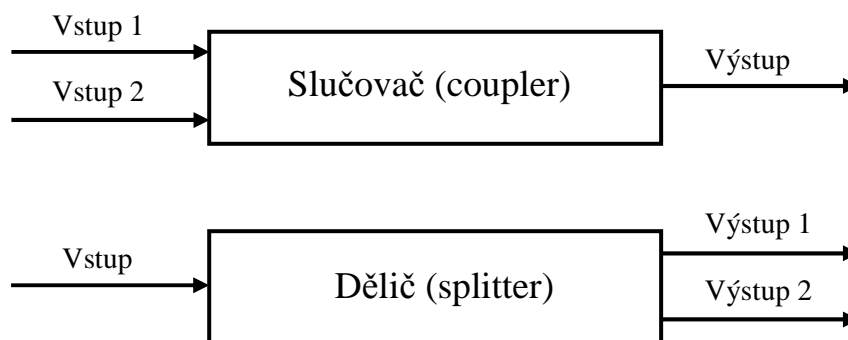
Obyčejně se tyto funkce provádí tak, že se vyváže světlo z vlákna ven, provedou se různé úpravy dle potřeby a světlo se naváže zpět do vlákna (aktivní prvek). Tento způsob má však tu nevýhodu, že dochází k přerušení optického paprsku, tím pádem k velkému nárůstu ztrát, problémům se stabilitou, zvětšením součástek a k dalším negativním vlivům.

K odstranění těchto značných problémů se používají optické součástky, u kterých při zpracování signálu nedochází k vyvázání optického signálu ven z vlákna (pasivní prvek). Ty se pak často snažíme vyrábět tak, aby byly plně slučitelné s optickými vlákny a nedocházelo tedy k nárůstu útlumu a k dalším ztrátám. V současné době je na trhu mnoho různých druhů těchto optických komponentů, které se využívají v mnoha nejrůznějších aplikacích. Mezi nejzákladnější patří zesilovače (amplifiers), děliče/slučovače (splitters/couplers) dále attenuators (zeslabovače), polarizátory, prvky sloužící k posuvu fáze, frekvence a mnoho dalších. [4]

2.2. Vlastnosti optických vazebních členů

Představme si situaci, kdy přenášené světlo v optickém vlákne potřebujeme rozdělit například do dvou optických vláken nebo naopak potřebujeme spojit dvě optická vlákna do jednoho. Toho snadno dosáhneme za pomoci jednoho **vazebního členu**.

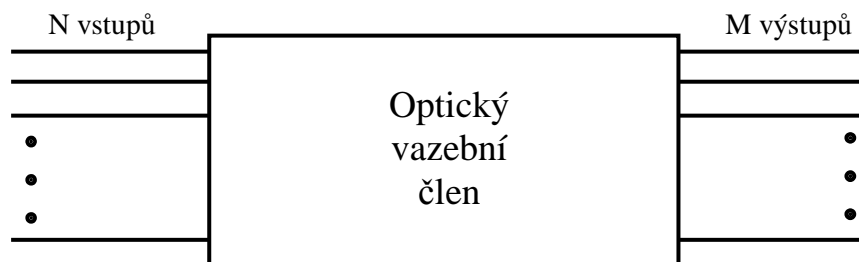
Většina vazebních členů jsou obousměrné prvky, mohou tedy jak slučovat, tak rozdělovat. Pokud je vazební člen použit ke spojení několika vláken do jednoho jedná se o **slučovač (coupler)**. Pokud slouží k rozdělení světla z jednoho vlákna do několika vláken, jde o **dělič (splitter)**.



Obrázek 1: Základní schéma slučovače a děliče

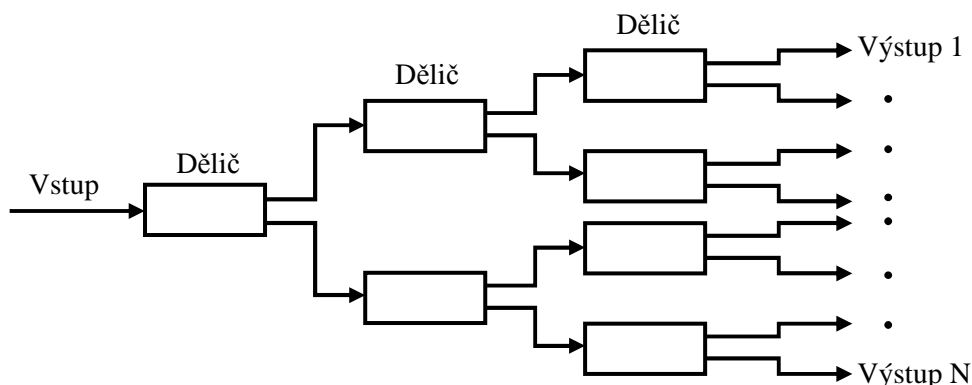
2.3. Typy vazebních členů

Vazební člen může být buď aktivní či pasivní prvek. Nejpoužívanější jsou pasivní vazební členy a jejich výhody jsou uvedené výše. Základní optický vazební člen má N vstupních portů a M výstupních portů. N a M typicky v rozsahu od 1 do 32. Počet vstupních portů a výstupních portů se mění v závislosti na výrobci a zamýšleném použití. Vazební člen s jedním vláknem na jednom konci a dvěma na druhém konci se označuje 1x2. Standardními typy jsou 1x2, 2x2, 1x3, 3x3, 1x4, 4x4, ale vyrábějí se i typy až do velikosti 32x32. Mohou být také multimódové nebo jednomódové, zachovávající polarizaci nebo nezachovávající polarizaci. Obrázek 2 ilustruje design základního vláknového optického vazebního členu $N \times N$.



Obrázek 2: Základní schéma optického vazebního členu NxN

Můžeme se setkat s různými druhy vazebních členů, jako jsou tree-coupler, vazební člen typu T (tee-coupler), star coupler, x coupler a WDM coupler [5]. Dále je možné couplery vzájemně propojovat pro získání nestandardního typu viz obrázek č. 3.



Obrázek 3: Způsob větvení vazebních členů pro získání nestandardního typu

2.4. Parametry vazebních členů

Standardní vazební členy rozdělují/spojují světlo v závislosti na použité vlnové délce. Nejlépe pracují, pokud je vlnová délka uvnitř pracovní šířky pásma vazebního členu. Důležité parametry standardních vazebních členů jsou **vazební poměr** (coupling ratio), **celkové ztráty** (excess loss), **vložné ztráty** (insertion loss), **směrovost** (directivity), **homogenita ztrát** (uniformity), **útlum zpětného odrazu**, rozsah operační vlnové délky (operation wavelength range), **polarizačně závislé ztráty** (polarization dependent loss - PLD), **izolace**, spolehlivost a cena. [6], [7], [8]

2.4.1. Vazební poměr (Coupling ratio)

Udává se jako poměr jednoho výstupu (P_2) k celkové sumě všech výstupů ($P_2 + P_3$) resp. v jakém poměru se na výstupu rozdělí/sloučí vstupní optický výkon. Například v 1x2 vazebním členu se vstupní signál může rozdělit mezi dva výstupy nejen rovným dílem, ale i v požadovaném procentu. V praxi jsou běžné 90/10 a 50/50. Pokud vazební poměr není 1:1, tak se v některých případech nazývá port s vyšším výkonem jako výkonový (throughput) port a druhý s nižším výkonem jako utlumený (tap) port. Pokud vazební člen vykonává funkci děliče, nazývá se tento údaj dělicí poměr (splitting ratio). [5], [8]

$$CR = -10 \log \frac{P_2(\lambda)}{P_2(\lambda) + P_3(\lambda)} \quad [\text{dB}; W, W, W] \quad (2.0)$$

Obvyklá relace: [8]

$$CR = \frac{P_2(\lambda)}{P_2(\lambda) + P_3(\lambda)} \cdot 100 \quad [\%; W, W, W] \quad (2.1)$$

2.4.2. Vazební tolerance (Coupling tolerance)

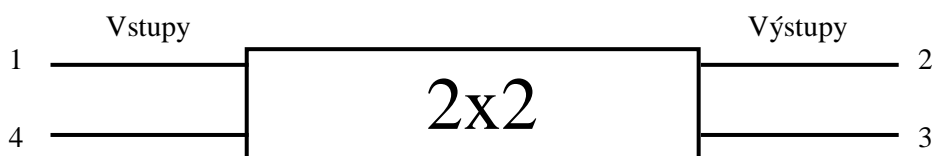
Dokonce, i když se dělicí poměr často udává jako 1:1, je velice nepravděpodobné, že se vstupní výkon ve skutečnosti rozdělí rovnoměrně mezi dva výstupy. Přijatelná chyba je mezi 1% a 5% a tuto chybu nazýváme vazební nebo dělicí tolerance. [5]

2.4.3. Vazební ztráty (Coupling loss)

Tyto ztráty jsou často přehlíženy. Kdykoli použijeme vazební člen, potřebujeme jej spojit se zbytkem optického média. K tomu jsou zapotřebí konektory a spojky, které způsobují určité ztráty. Tyto ztráty je pak nutné připočítat k celkovým ztrátám vazebního členu.

2.5. Označování ztrát

Pokud se podíváme do různých odborných literatur, zjistíme, že jednotlivé termíny používané k popisu ztrát u vazebních členů se často liší. Používá se různé značení portů, různé označování vstupních a výstupních výkonů a to vede k odlišným verzím definic a vzorců pro každou ztrátu. Způsobem jak se vyhnout těmto problémům je pochopit povahu ztrát a poté být flexibilní pokud se setkáme s jiným vyjádřením.



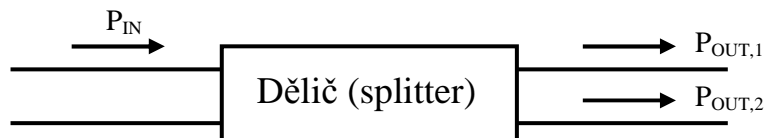
Obrázek 4: Základní schéma optického vazebního členu 2x2

Pokud bychom se podívali obecně na tuto problematiku, ztráty vypočítáme, jako poměr výstupního výkonu k vstupnímu. Chceme-li tuto relaci vyjádřit v decibelech, použijeme následující vzorec [5]:

$$Ztráty(\lambda) = -10 \log \left(\frac{P_{VÝSTUPNÍ}(\lambda)}{P_{VSTUPNÍ}(\lambda)} \right) \quad [\text{dB}; W, W] \quad (2.2)$$

U vazebních členů se však setkáváme s celou řadou ztrát a nestačí nám pouze určit, jak velké množství výkonu se dostane ze vstupu na výstup. Proto pokud chceme tento prvek nejen správně používat, ale také porozumět jeho chování, musíme umět jednotlivé ztráty rozdělit a vypočítat.

2.5.1. Celkové ztráty (Excess loss)



Obrázek 5: Celkové ztráty

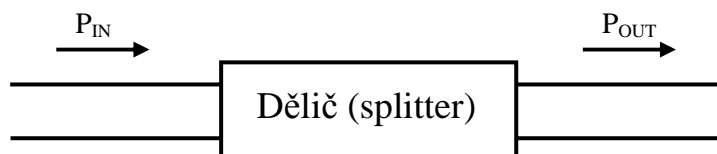
Udávají poměr veškerého výstupního výkonu k veškerému vstupnímu výkonu: [6]

$$EL(\lambda) = -10 \log \frac{\sum_{n=0}^i P_{OUT,n}(\lambda)}{P_{IN}(\lambda)} \quad [\text{dB}; W, W] \quad (2.3)$$

kde P_{OUT} je výstupní optický výkon, P_{IN} je vstupní optický výkon, i je počet výstupních portů. Celkové ztráty jsou pro vazební člen nejdůležitějším ukazatelem kvality. Odráží podstatné technologické nedostatky v postupu výroby. Nejčastější příčinou těchto ztrát je pohlcení nebo rozptyl světla ve vazebním členu.

2.5.2. Vložné ztráty (Insertion loss)

Označujeme jako poměr optického výkonu konkrétního výstupu k celkovému vstupnímu výkonu.



Obrázek 6: Vložné ztráty

Pro příslušnou vlnovou délku λ se vypočítají jako: [6]

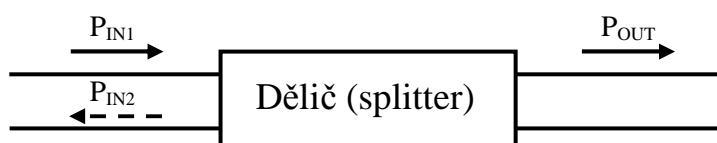
$$IL(\lambda) = -10 \log \frac{P_{OUT,i}(\lambda)}{P_{IN}(\lambda)} \quad [\text{dB}; W, W] \quad (2.4)$$

kde $P_{OUT,i}$ je optický výkon na konkrétním výstupu a P_{IN} je vstupní optický výkon.

Zjišťujeme-li ztráty na výstupu s větším výkonem (vazební poměr není 1:1) označují se tyto ztráty jako ztráty na výkonovém portu (throughput loss). Pokud je tomu naopak označují se jako ztráty na utlumeném portu (tap loss). Vložné ztráty vazebních členů dostupných v současné době na trhu bývají okolo 3 dB (pro dělicí poměr 50/50). V příloze č. 1 a 2 jsou uvedeny konkrétní katalogové údaje vazebních členů od firmy Optokon, které používám v této práci.

2.5.3. Směrovost (Directivity)

Tento pojem se také někdy označuje jako přeslech resp. směrovostní ztráty DL (directionality loss) nebo přeslech na blízkém konci (NEXT). Vyjadřuje míru izolace mezi vstupy vazebního členu. Jedná se o to, že pokud přivedeme na vstup vazebního členu optický výkon P_{IN1} , tak by se tento výkon měl objevit pouze na výstupu. Někdy se však malá část výkonu objeví i na dalším vstupu P_{IN2} , což je nežádoucí. Tento parametr je důležitý u WDM multiplexerů, kde odražený výkon zpět do vysílače musí být co nejmenší. Viz obrázek č. 7. [9]



Obrázek 7: Směrovost

Vypočítá se jako: [8]

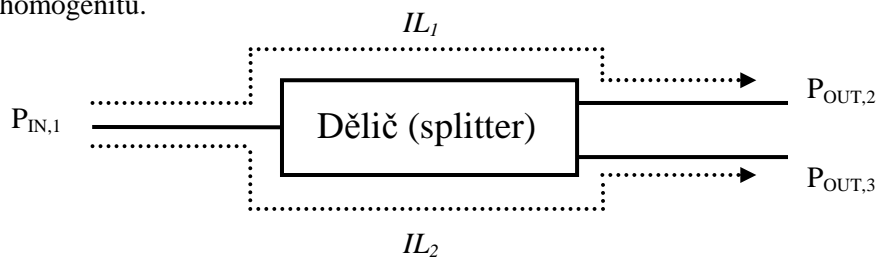
$$D(\lambda) = -10 \log \left(\frac{P_{IN2}(\lambda)}{P_{IN1}(\lambda)} \right) \quad [\text{dB}; W, W] \quad (2.5)$$

Úroveň směrovosti se běžně pohybuje okolo 40-60 dB. Pokud bychom hovořili o směrovostních ztrátách DL . Vypočítají se obdobně jako směrovost s tím rozdílem, že jsou zde prohozeny výkony P_{IN1} a P_{IN2} . Jak je vidět ve vzorci č. 2.6. Výsledkem je stejná hodnota jako u směrovosti D , pouze s opačným znaménkem.

$$DL(\lambda) = -10 \log \left(\frac{P_{IN1}(\lambda)}{P_{IN2}(\lambda)} \right) \quad [\text{dB}; W, W] \quad (2.6)$$

2.5.4. Homogenita ztrát (Uniformity)

Je parametr, který má význam především u symetrických 3dB děličů (50/50). Jedná se o děliče, kdy je v obou výstupních větvích 3 dB útlum neboli polovina vstupního výkonu. Vstupní výkon se tedy v ideálním případě rozděluje rovnoměrně do obou větví. Setkáme se však s tím, že se výstupní výkony od sebe trochu liší a právě tento rozdíl popisuje parametr homogenita ztrát. V ideálním případě jsou útlumy resp. vložné ztráty IL_1 a IL_2 stejné, pokud nejsou stejné, jedná se o nehomogenitu.



Obrázek 8: Homogenita ztrát

Homogenita ztrát je definována jako: [8]

$$U = IL_{MAX} - IL_{MIN} \quad [dB; dB, dB] \quad (2.7)$$

kde IL_{MAX} jsou maximální vložné ztráty a IL_{MIN} jsou minimální vložné ztráty.

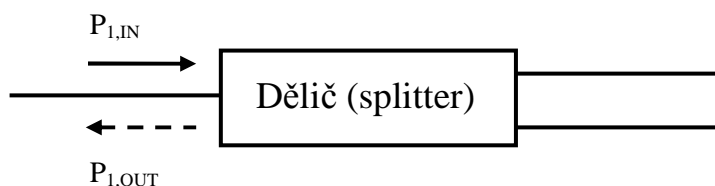
Pro 3dB dělič platí: [8]

$$U = -10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) - \left[-10 \log \frac{P_3}{P_1} \right] = 10 \log \frac{P_3}{P_2} \quad [dB; W, W] \quad (2.8)$$

Pokud je homogenita ztrát rovna nule, získáme ideální dělič, který rovnoměrně rozdělí výkony.

2.5.5. Útlum zpětného odrazu (Return loss)

Tento parameter udává, jak velké množství vstupního výkonu se odrazí zpět na vstup. Princip spočívá v tom, že energie navázaná do vlákna se rozptyluje (Rayleighovo rozptýlení) a část této energie se vrací na vstup vlákna. Dochází také k nežádoucímu Fresnelovu odrazu, který nastává na rozhraní dvou prostředí s různým indexem lomu tj. v optickém konektoru, na konci a na začátku vlákna a může vzniknout i ve svařovaném spoji.



Obrázek 9: Útlum zpětného odrazu (return loss)

Vypočítá se jako: [8]

$$RL = -10 \log \left(\frac{P_{1,OUT}}{P_{1,IN}} \right) \quad [\text{dB}; W, W] \quad (2.9)$$

kde RL je útlum zpětného odrazu, $P_{1,IN}$ je výkon vstupního signálu a $P_{1,OUT}$ je výkon odraženého signálu.

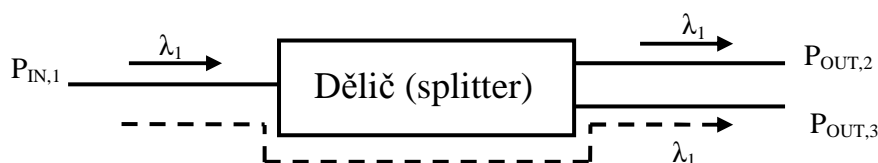
2.5.6. Polarizačně závislé ztráty (PDL)

Jak je uvedeno výše. Vazební členy mohou být polarizačně závislé nebo polarizačně nezávislé. PDL jsou velice podstatným parametrem. Představují maximální odchylku vložných ztrát IL , pokud změním polarizaci světla. Bude-li vazební člen polarizačně závislý a budeme měřit výstupní výkon samostatně, zachová se sice dělicí poměr, ale světlo bude polarizačně odlišné v jednom a druhém směru. To není na závadu, pokud máme dále prvky, které nejsou polarizačně závislé. Jakmile však zapojíme do kaskády polarizačně závislý prvek, dostaneme jiné hodnoty výstupních výkonů. Z tohoto důvodu se snažíme, aby byla polarizační závislost co nejmenší.

V dnešní době jsou však v popředí teoretického zájmu i tzv. koherentní komunikace. Tam se naopak vyžaduje, aby byli všechny prvky maximálně polarizačně závislé, aby zachovávali například pouze jeden polarizační stav. Typické aplikace jsou ve vláknově optických senzorech nebo ve vláknových gyroskopech.

2.5.7. Izolace – spektrální přeslech

Také se někdy označuje jako přeslech na vzdáleném konci (far-end crosstalk). Udává míru toho, jak dobře jsou odděleny jednotlivé vlnové délky na výstupu WDM multiplexeru. [10] Je to poměr nežádoucího výkonu k žádoucímu výkonu, který chceme v daném kanále mít. Jedná se o velmi významný parametr, který určuje speciálně u WDM kvalitu multiplexeru. Je zapotřebí tento parametr velice pečlivě sledovat, protože rozhoduje o tom, jak velký bude odstup signál od šumu. Optický signál o nežádoucí vlnové délce (cizí spektrální kanál) představuje šum. Jakmile se snižuje odstup signálu od šumu, narůstá chybovost. [8]



Obrázek 10: Izolace – spektrální přeslech

Izolace se vypočítá podle vztahu: [8]

$$I = -10 \log \left(\frac{P_{\text{VÝSTUP V CIZÍM SPEKTRÁLNÍM KANÁLU}}}{P_{\text{VSTUP DO VLASTNÍHO SPEKTRÁLNÍHO KANÁLU}}} \right) \quad [\text{dB}; W, W] \quad (2.10)$$

Pro situaci na obrázku č. 10 by platil následující vzorec č. 2.11:

$$I = -10 \log \left(\frac{P_{OUT,3}(\lambda_1)}{P_{IN,1}(\lambda_1)} \right) \quad [\text{dB}; W, W] \quad (2.11)$$

Kvalitní vazební členy by měli mít nízké vložné ztráty, nízké celkové ztráty, vysokou směrovost, vysokou homogenitu (nízkou homogenitu ztrát), vysokou izolaci a malé PLD.

3. Princip činnosti vláknově optických děličů pro WDM

Tato kapitola se věnuje principu činnosti vláknově optických děličů pro WDM, jsou zde uvedeny základní pojmy, definice, technologie výroby a také seznámení s technologií WDM jako takovou.

3.1. Úvod do WDM

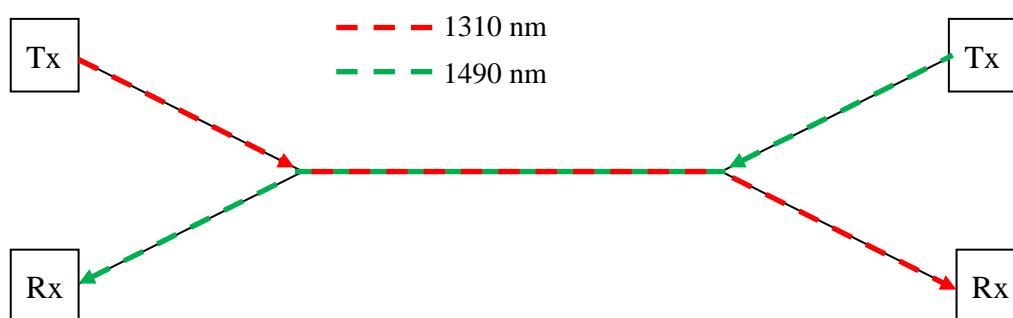
S postupným zvyšováním požadavků na objem, kvalitu, spolehlivost a rychlost přenášených dat je zapotřebí hledat způsoby efektivnějšího využití obrovské přenosové kapacity optického vlákna. Současná věda vychází z toho, že rychlost světla je nejvyšší rychlost, kterou lze přenášet jakoukoli formu informace. Z tohoto důvodu se pro přenos dat čím dál více využívá optických vláken a klade se důraz na vývoj a výzkum nových technologií umožňujících rychlejší, lepší a ekonomicky výhodnější způsob přenosu světla v optických systémech.

Jednou z nich je i WDM (Wavelength-Division Multiplexing) technologie. Publikovaná již v roce 1970. V roce 1978 poprvé úspěšně realizována v laboratořích pouze se dvěma kanály. Pracuje na principu sdružování několika nezávislých optických kanálů, které byly dříve přenášeny různými vlákny do jediného vlákna, na základě vlnového resp. frekvenčního dělení. Každému kanálu je přiřazena určitá vlnová délka λ . Tyto jednotlivé vlnové délky jsou přenášeny společně jedním optickým vláknem, čímž se výrazně zvýší přenosová kapacita. Jinak řečeno do optického vlákna je navázán optický signál nejméně o dvou různých vlnových délkách. Pomocí vazebních členů, které tyto vlnové délky umí sloučit a na konci linky zase rozdělit, tak můžeme přenášet v závislosti na typu multiplexeru několik desítek, popřípadě i stovek, jednotlivých optických kanálů jedním optickým vláknem na velkou vzdálenost a mohou dosáhnout přenosových kapacit v řádech Tbit.s^{-1} . V současné době drží rekord společnost Alcatel-Lucent Bell Labs ($15,5 \text{ Tbit.s}^{-1}$) [12].

Podle způsobu použití a množství přenášených vlnových délek se setkáme s následujícími typy vlnových multiplexů.

3.1.1. WDM

Základní vlnový multiplex používá pro přenos pouze dvě, resp. tři vlnové délky většinou v obousměrném provozu na jednom optickém vlákně. Pasivní vlnový multiplexer je jednoduché a levné zřízení, které je schopné spojit nebo rozdělit dvě vlnové délky do jednoho vlákna. Pro aplikace na MM vlákne se používá kombinace vlnových délek 850 nm a 1300 nm a pro aplikace na SM vláknech vlnové délky 1310 nm a 1550 nm. V systémech PON pro použití s distribucí videosignálu se používají tři vlnové délky - 1310 nm a 1490 nm pro přenos dat a 1550 nm pro videosignál. [11] Obousměrný přenos lze řešit buď samostatnými vlákny, nebo dnes častěji právě vlnovým dělením. Přenos je pak uskutečněn po jediném vlákně, a to např. jedním směrem na vlnové délce 1310 nm a druhým směrem na vlnové délce 1490 nm viz obrázek 11.



Obrázek 11: Přenos signálu po jednom optickém vlákně

3.1.2. WWDM

Široký vlnový multiplex většinou používá čtyři vlnové délky v oblasti 850 nm MM vlákna nebo v oblasti 1300 nm MM nebo SM optická vlákna. WWDM je nejčastěji používána pro přenos Gigabitového a 10 Gigabitového Ethernetu (rozhraní 10GBASE-LW). Jednotlivé vlnové délky WWDM multiplexu pak mají typicky odstup 25 nm.

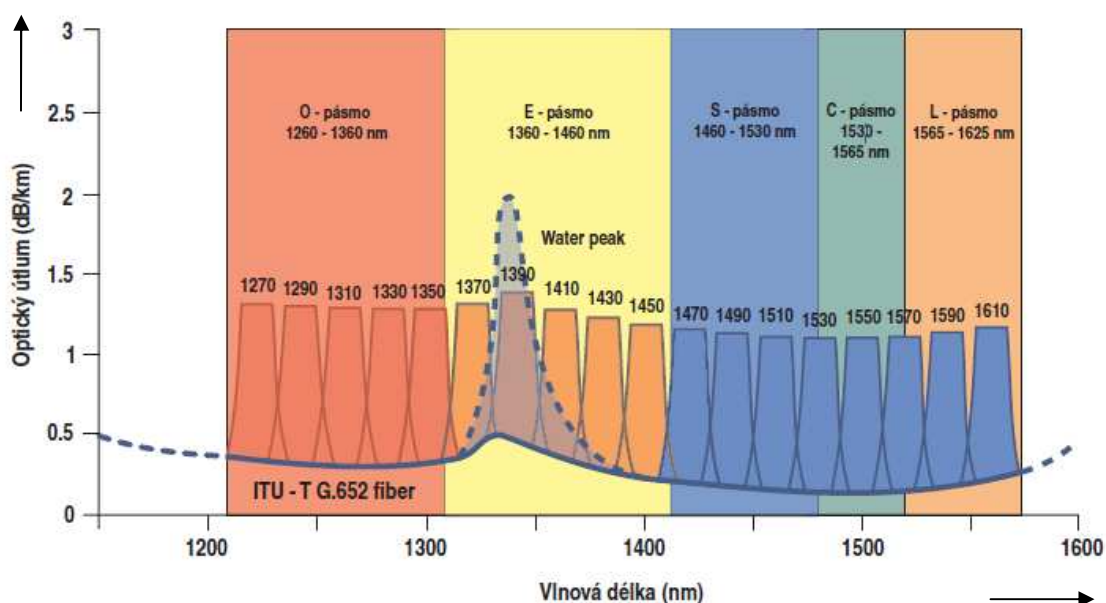
3.1.3. DWDM

Hustý vlnový multiplex se používá hlavně na dálkových optických trasách a vyžaduje kvalitní, nákladné laserové zdroje a ostatní precizní optické komponenty, jako jsou optické zesilovače EDFA apod., doporučení ITU-T G. 694.1, viz příloha 15. Specifikuje jednotlivé přenosové kanály v oblasti vlnových délek v rozsahu od 1490 nm (200,95 THz) do 1620 nm (186,00 THz), (tzv. S, C a L pásmo). Toto doporučení počítá s odstupem jednotlivých kanálů v rozsahu 100 GHz (odstup cca 0,8 nm) nebo s dvojnásobným počtem kanálů s odstupem 50 GHz (0,4 nm). (Vlnové délky jsou dopočítány z frekvence s použitím rychlosti světla ve vakuu $c = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

3.1.4. CWDM

Je forma vlnového multiplexu, která využívá větší odstup mezi jednotlivými přenosovými kanály, než je tomu u klasické technologie DWDM. Jednotlivé vlnové délky CWDM technologie jsou v rozsahu 1270 nm až 1610 nm se vzájemným odstupem 20 nm.

Systémy CWDM jsou obecně levnější ve srovnání se systémy DWDM o srovnatelném počtu kanálů. Doposud tato technologie představovala pouze okrajový segment trhu. Nachází uplatnění zejména v koncových systémech optických sítí a řada provozovatelů nabízí hybridní C/DWDM systémy umožňující snadnou migraci v souladu s nárůstem skutečných potřeb uživatelů. [11]



Obrázek 12: CWDM Kanály podle ITU - T G. 694. 2 [11]

3.2. Závislost na vlnové délce

Vláknově optické děliče jsou většinou optimalizované pro vlnové délky 1310 nm nebo 1550 nm nebo pro obě dohromady. Použijeme-li jinou vlnovou délku, než pro jakou jsou vyrobené, změní se jejich dělicí poměry a další významné parametry. Můžeme se setkat tedy setkat s následujícími vazebními členy:

- Achromatické – **nezávislé** na vlnové délce λ (spektrálně nezávislé). Vlnová délka na vstupu se objeví i na výstupu. Používají se jako děliče výkonu.
- Chromatické – **závislé** na vlnové délce λ (spektrálně závislé). Chovají se selektivně vzhledem k vlnovým délkám. Umožňují preferovat určité λ v daných směrech. Právě tato vlastnost se využívá u vlnových multiplexů pro dělení vlnových délek.

3.3. Základní vlastnosti vláknového vazebního členu

Abychom byli schopni popsat princip činnosti WDM vazebního členu je nejprve nutné znát některé základní principy funkce vláknového vazebního členu. Vlnovodný vazební systém můžeme zjednodušeně popsat jako jeden vlnovod se dvěma jádry. Pokud si představíme dva módy (vidy), které se šíří vlnovodem s různou konstantou šíření β , tak mezi nimi začne vznikat fázový rozdíl $\Delta\beta$. Když je tento fázový rozdíl roven π , tak má superpozice těchto dvou módů za následek zrušení výkonu v jednom vlnovodu a objevení se ve druhém. Jakmile dalším postupem o stejnou vzdálenost vznikne fázový rozdíl 2π , tak se výkon přesune zpět do prvního vlnovodu. Takhle dochází k periodické výměně výkonů mezi dvěma vlnovody. Pokud je konstanta šíření módů stejná, dochází ke kompletní výměně výkonů, naopak pokud není stejná, ke kompletní výměně nedochází. Fázový rozdíl $\Delta\beta$ se vypočítá jako:

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 \quad (3.0)$$

Z toho plyne, pokud se fázový rozdíl $\Delta\beta \neq 0$ nedochází ke kompletní výměně výkonů. Aby docházelo ke kompletní výměně, musí být $\Delta\beta = 0$. [4]

Chceme-li nastavovat dělicí poměry, musíme vhodně nastavit délku vazební oblasti, a proto musíme znát hodnotu vazebního koeficientu κ , který udává míru interakce mezi dvěma vlákny. Závisí na parametrech vláken, vzdálenosti mezi jádry, používané vlnové délce, poměrném rozdílu indexu lomu Δ , normalizované vzdálenosti d a na normalizované frekvenci V [4]. Viz vzorec č. 3.10

Vezeme-li v úvahu bezztrátový vláknový vazební člen vyrobený z identických vláken s fázovým rozdílem $\Delta\beta = 0$, kde $P_1(0)$ je vstupní výkon budou platit následující rovnice:

$$P_1(z) = P_1(0) \cos^2 \kappa(\lambda) \cdot z \quad (3.1)$$

$$P_2(z) = P_1(0) \sin^2 \kappa(\lambda) \cdot z \quad (3.2)$$

Z rovnic 3.1, 3.2 je patrná periodická výměna výkonu mezi dvěma vlákny. Pokud například chceme zajistit, že veškerý výkon bude ve vstupním vlákně, musí platit:

$$z = 0, \frac{\pi}{\kappa}, \frac{2\pi}{\kappa}, \dots = \frac{m\pi}{\kappa}; \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3.3)$$

Pro 100% výkon ve vstupním vlákně (výstup 1, obrázek č. 15) platí:

$$P_1(z) = P_1(0) \cos^2 \kappa(\lambda) \cdot z = P_1(0) \cos^2(\pi) = P_1(0) \quad (3.4)$$

Dosažením do druhé rovnice pro výkon P_2 si ověříme platnost:

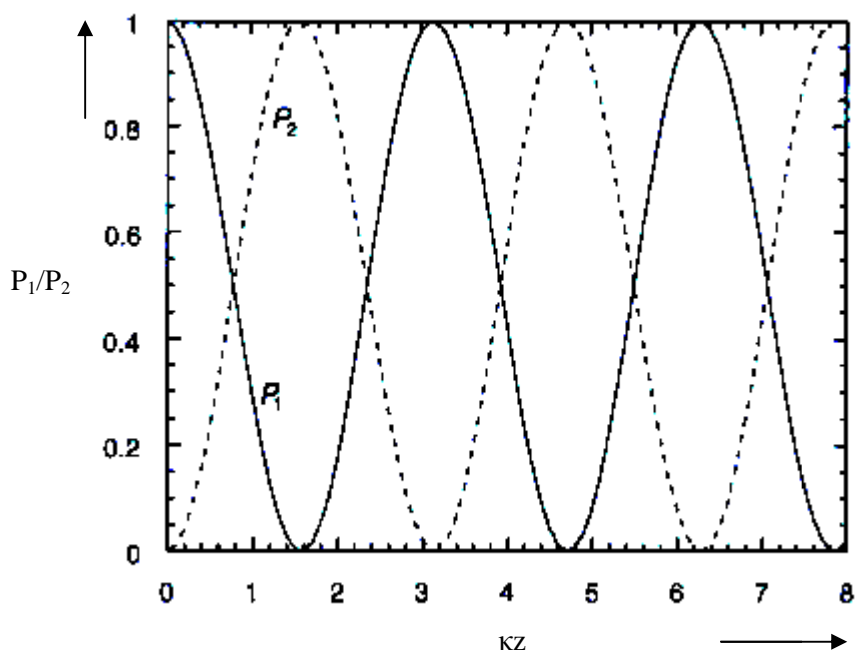
$$P_2(z) = P_1(0) \sin^2 \kappa(\lambda) \cdot z = P_1(0) \sin^2(\pi) = 0 \quad (3.5)$$

P_2 je roven nule tudíž je veškerý výkon ve vstupním vlákně. Jestliže chceme zajistit, že veškerý výkon bude ve druhém vlákně, musí platit:

$$z = \frac{\pi}{2\kappa}, \frac{3\pi}{2\kappa}, \frac{5\pi}{2\kappa}, \dots = \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\pi}{\kappa}; \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3.6)$$

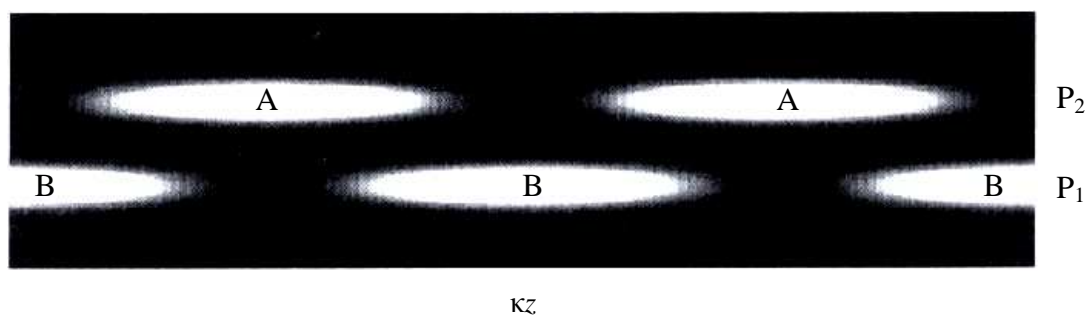
V tomto případě $P_1(z) = 0$, $P_2(z) = P_1(0)$ a veškerý výkon bude v druhém vlákně (výstup 2, obrázek č. 15). [4]

Na následujícím obrázku č. 13 vidíme, jak se mění hodnota výkonu ve výstupních vláknech v závislosti na hodnotě kz .



Obrázek č. 13: Výkon ve výstupních vláknech v závislosti na hodnotě kz [4]

Na obrázku č. 14 je zobrazeno rozložení hustoty výkonů P_2 a P_1 a jejich přelévání z jednoho výstupu do druhého v závislosti na hodnotě kz .



Obrázek č. 14: Zobrazení hustoty výkonu v jednotlivých výstupech [4]

V bodě A je maximální výkon ve druhém vlákne (výstup 2, obrázek č. 15) a v bodě B je maximální výkon ve vstupním vlákne (výstup 1, obrázek č. 15), **vhodnou volbou kz** můžeme nastavit požadovaný dělicí poměr.

Minimální vzdálenost, při které je výkon ze vstupního vlákna zcela navázán do druhého vlákna, je dána vztahem:

$$z = L_c = \frac{\pi}{2\kappa(\lambda)} \quad (3.7)$$

Označuje se jako délka vazební oblasti (coupling length). Jak je vidět ze vztahu 3.7, čím vyšší je hodnota vazebního koeficientu κ (silnější vazba), tím menší musí být délka vazební oblasti. Pro běžně používaná jednomódová vlákna je délka vazební oblasti přibližně 2 - 5 mm.

Nejčastější aplikací vazebního členu je tzv. 3dB dělič. Pro něj platí, že polovina výkonu je v jednom vlákne (výstup 1, obrázek č. 15) a druhá polovina ve druhém (výstup 2, obrázek 15). Pokud zvolíme $z = 45^\circ = \frac{\pi}{4}$ a dosadíme do vzorců č. 3.1 a 3.2 tak dostaneme:

$$P_1 = P_{IN} \cos^2 \kappa(\lambda) \cdot z = P_{IN} \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} \right) = \frac{1}{2} P_{IN} \quad (3.8)$$

$$P_2 = P_{IN} \sin^2 \kappa(\lambda) \cdot z = P_{IN} \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} \right) = \frac{1}{2} P_{IN} \quad (3.9)$$

P_{IN} je vstupní výkon. Na výstupu vazebního členu bude tedy polovina výkonu P_{IN} v jednom vlákne a polovina P_{IN} ve druhém vlákne (3dB dělič výkonu). Vhodným výběrem hodnoty κL můžeme vyrobit vazební člen s libovolným vazebním poměrem. Vazební koeficient κ je závislý na vlnové délce, proto bude tento vazební člen pracovat správně pouze pro navrženou pracovní vlnovou délku. [4]

Vazební koeficient pro identická vlákna se vypočítá podle následujícího vzorce: [4]

$$\kappa(d, V) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sqrt{2\Delta}}{a} \cdot e^{-(A+B\tilde{d}+C\tilde{d}^2)} \quad (3.10)$$

$$A = 5,2789 - 3,663V + 0,3841V^2 \quad (3.11)$$

$$B = -0,7769 + 1,2252V - 0,0152V^2 \quad (3.12)$$

$$C = -0,0175 - 0,0064V - 0,0009V^2 \quad (3.13)$$

Poměrný rozdíl indexů lomu Δ se vypočítá jako:

$$\Delta = \frac{\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}}{2} \quad (3.14)$$

Normalizovaná vzdálenost:

$$\tilde{d} = \frac{d}{a} \quad (3.15)$$

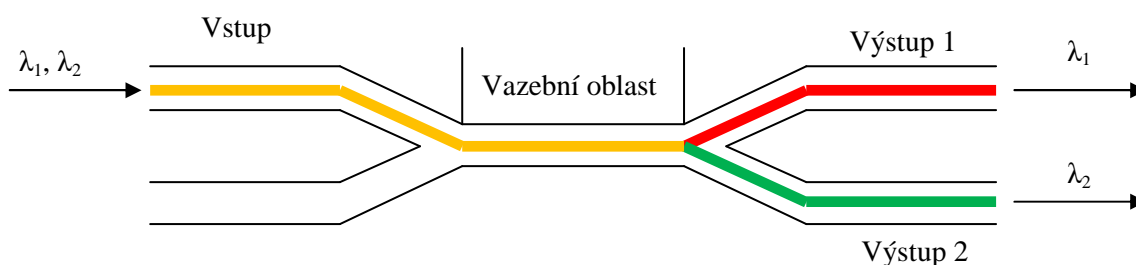
Normalizovaná frekvence:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.16)$$

Počet módů ve vlákně můžeme určit pomocí normalizované frekvence. Normalizovaná frekvence zohledňuje vlnovou délku λ , numerickou aperturu NA, průměr vlákna a . Právě tato frekvence určuje, zda je vlákno jednomódové nebo multimódové. Pro jednomódové vlákno musí platit $V \leq 2,405$.

3.4. Popis funkce WDM vazebního členu

Jak je uvedeno výše vazební koeficient κ (coupling koeficient) je závislý na vlnové délce viz 3.10 - 3.16. Z tohoto důvodu jsou také FBT vazební členy závislé na vlnové délce. Chceme-li používat vazební člen jako WDM MUX/DEMUX, musíme zajistit vhodnou velikost vazební oblasti L pro všechny vlnové délky. Provedeme to tak, že vypočítáme vazební koeficienty pro jednotlivé vlnové délky například λ_1 a λ_2 a zvolíme délku vazební oblasti L tak, aby byly splněny rovnice 3.17 a 3.18. V takovém případě bude světlo o vlnové délce λ_1 vystupovat ze vstupního vlákna (výstup 1, obrázek č. 15) a světlo o vlnové délce λ_2 z druhého vlákna (výstup 2, obrázek č. 15). [4]



Obrázek 15: Vláknový vazební člen jako WDM demultiplexer

Uvažujme-li vazební člen délky zhotovený z identických vláken. κ_1 a κ_2 jsou vazebními koeficienty pro vlnové délky λ_1 a λ_2 platí:

$$\kappa_1 L = m\pi \quad (3.17)$$

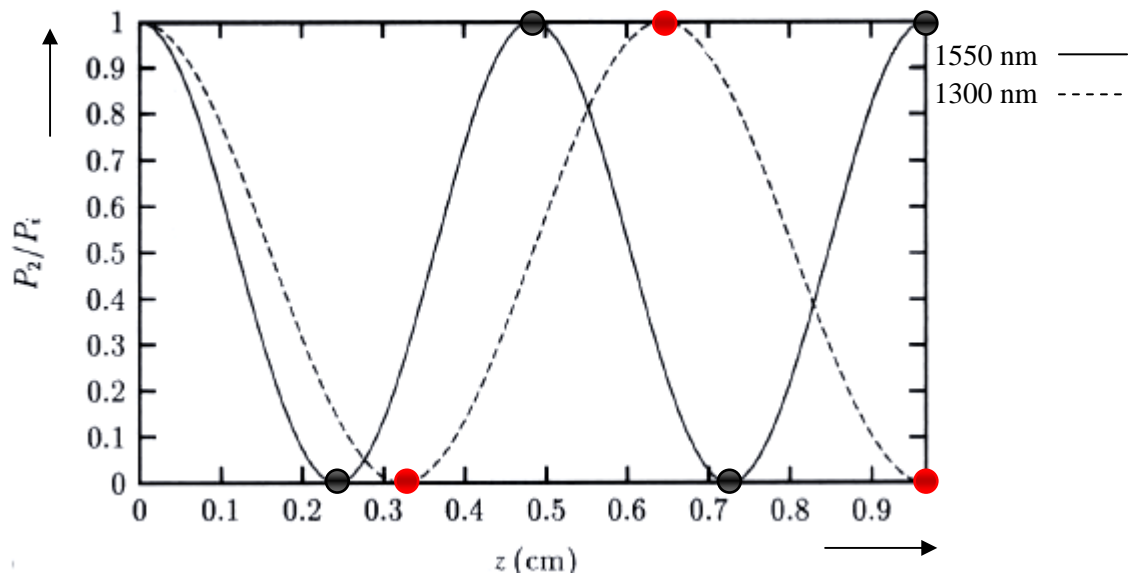
$$\kappa_2 L = \left(m - \frac{1}{2}\right)\pi \quad (3.18)$$

Pokud je světlo o dvou různých vlnových délkách navázáno do vlákna současně, tak pro světlo o vlnové délce λ_1 platí:

$$P_2(\lambda_1, L) = P_1 \sin^2(\kappa_1 L) = 0 \quad (3.19)$$

Pro světlo vlnové délky λ_2 :

$$P_2(\lambda_2, L) = P_1 \sin^2(\kappa_2 L) = P_i \quad (3.20)$$



Graf 1: Normalizovaný výkon na výstupu 2 [4]

Výše uvedený graf č. 1 znázorňuje střídání normalizovaného výkonu vystupujícího z výstupu 2 (viz obrázek 15) v závislosti na vazební vzdálenosti z , pro vazební člen uvedený v příkladu. (viz hodnoty 3.21). Plnou čarou je znázorněna vlnová délka 1550 nm a čárkovanou čarou vlnová délka 1300 nm. Barevnými body jsou vyznačeny délky vazebních oblastí pro příčné vlnové délky (viz výpočet 3.30 a 3.32).

Příklad výpočtu vazebního koeficientu a vazební vzdálenosti pro vazební člen s těmito parametry:

$$\begin{aligned} n_1 &= 1,4525 \\ n_2 &= 1,45 \\ a &= 5,6 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Pro vlnovou délku 1550 nm vypočítáme jednotlivé veličiny dosazením do vzorců č. 3.14 - 3.16:

$$\tilde{d} = \frac{d}{a} = \frac{13,85}{5,6} = 2,473 \mu\text{m} \quad (3.22)$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{\frac{n_1 + n_2}{2}} = \frac{1,4525 - 1,45}{\frac{1,4525 + 1,45}{2}} = 1,72 \cdot 10^{-3} \quad (3.23)$$

$$V(1,55 \mu\text{m}) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{1,55} \cdot 5,6 \cdot \sqrt{1,4525^2 - 1,45^2} = 1,93 \quad (3.24)$$

Dále vypočítáme koeficienty A, B, C dosazením do vzorců 3.11 - 3.13:

$$A = 5,2789 - 3,663V + 0,3841V^2 = -0,3639 \quad (3.26)$$

$$B = -0,7769 + 1,2252V - 0,0152V^2 = 1,5357 \quad (3.27)$$

$$C = -0,0175 - 0,0064V - 0,0009V^2 = -0,0332 \quad (3.28)$$

Všechny výše vypočítané veličiny dosadíme do vzorce 3.10 pro výpočet vazebního koeficientu κ :

$$\begin{aligned} \kappa_1(1,55 \mu\text{m}) &= \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sqrt{\delta}}{a} \cdot e^{-(A+B\tilde{d}+C\tilde{d}^2)} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sqrt{3,439 \cdot 10^{-3}}}{5,6} \cdot e^{-3,22671} = 16,4 \cdot e^{-3,22671} = \\ &= 16,4 \cdot 0,039 = 0,6396 \text{mm}^{-1} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Hodnotu vazebního koeficientu dále dosadíme do vzorce 3.7 a zjistíme velikost vazební oblasti L_c :

$$L_c = \frac{\pi}{2\kappa_1} = \frac{\pi}{2 \cdot 0,6396} = 2,456 \text{mm} \quad (3.30)$$

Stejný postup výpočtu aplikujeme pro vlnovou délku 1300 nm a vypočítáme hodnoty:

$$\kappa_2(1,3\mu m) = 0,4797 \text{ mm}^{-1} \quad (3.31)$$

$$L_c = \frac{\pi}{2\kappa_2} = \frac{\pi}{2 \cdot 0,4872} = 3,224 \text{ mm} \quad (3.32)$$

Jak je uvedeno výše pro WDM mux/demux musí současně platit vztahy 3.17 a 3.18 [4]. Pokud do nich dosadíme vypočítané hodnoty vazebních koeficientů κ_1 a κ_2 (viz 3.29 a 3.31). Vyřešíme soustavu dvou rovnic o dvou neznámých 3.33 a 3.34 a tím vypočítáme společný násobek pro obě vlnové délky:

$$\kappa_1 L = m\pi \quad (3.33)$$

$$\kappa_2 L = (m - \frac{1}{2})\pi \quad (3.34)$$

Dostaneme hodnotu $m = 2$ a zpětným dosazením do původních rovnic 3.33 a 3.34 získáme hodnotu $\kappa_1 L$ a $\kappa_2 L$:

$$\kappa_1 L \cong 2\pi \quad (3.35)$$

$$\kappa_2 L \cong \frac{3}{2}\pi \quad (3.36)$$

Z toho plyne L :

$$L(1,55\mu m) = \frac{2\pi}{\kappa_1} = \frac{2\pi}{0,6396} = 9,823 \text{ mm} \quad (3.37)$$

$$L(1,3\mu m) = \frac{3\pi}{2\kappa_2} = \frac{3\pi}{2 \cdot 0,4797} = 9,823 \text{ mm} \quad (3.38)$$

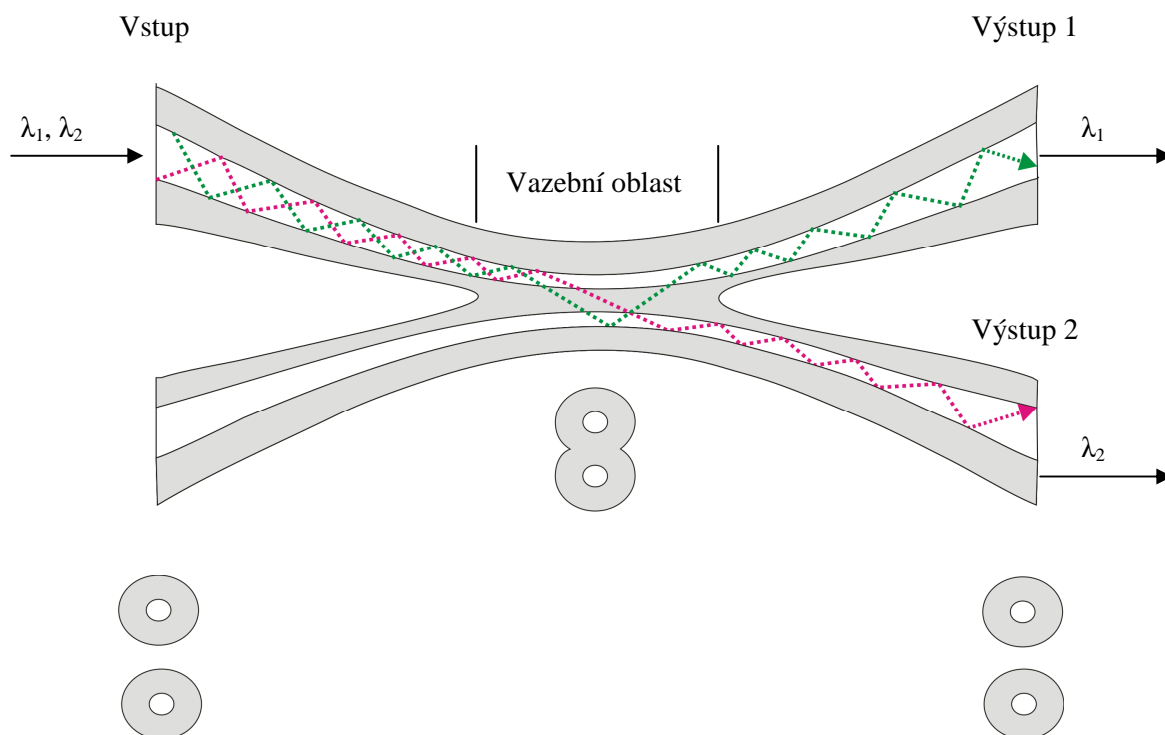
Pokud společnou délku vazební oblasti L podělíme délkou vazební oblasti pro příslušnou vlnovou délku L_c zjistíme, že zde najdeme čtyři vazební vzdálenosti (černé body v grafu 1) pro vlnovou délku 1550 nm a tři pro vlnovou délku 1300 nm (červené body v grafu 1).

$$L(1,55\mu m) = \frac{L}{L_c} = \frac{9,823}{2,456} \doteq 4 \quad L(1,3\mu m) = \frac{L}{L_c} = \frac{9,823}{3,224} \doteq 3 \quad (3.39)$$

Výše uvedený příklad vláknového vazebního členu je založený na identických vláknech s použitím různých vazebních koeficientů v závislosti na vlnových délkách. Takové vazební členy mají obvykle velké rozestupy mezi jednotlivými vlnovými délkami, aby nedocházelo ke vzájemnému ovlivňování. Vlnovou selektivitu však můžeme významně zvýšit použitím vazebních členů tvořených ze značně rozdílných vláken. Pokud totiž vybereme dvě vlákna tak, že se jejich módová konstanta šíření β rovná jen při specifické vlnové délce, dochází k účinné výkonové výměně pouze při této vlnové délce. Blízké vlnové délky nebudou mít stejnou módovou konstantu šíření, což má za následek vznik fázového rozdílu, při kterém nedochází k výměně výkonu mezi vlákny, viz princip funkce vláknového vazebního členu výše. Tímto způsobem lze dosáhnout účinného multiplexování/demultiplexování. Takové vazební členy pak mohou pracovat s daleko menším rozstupem vlnových délek, než je tomu u vazebních členů tvořených z identických vláken. [4]

3.5. Technologie výroby vazebních členů pro WDM

Nejpoužívanější technologie výroby různých druhů vazebních členů včetně WDM multiplexerů a demultiplexerů je technologie FBT (Fused Biconical Taper). Tyto celo-vláknové vazební členy nazývané také tavené vláknové vazební členy „fused fiber couplers“ se využívají tam, kde nemáme speciální nároky na stabilitu. Jsou levné, relativně jednoduché na výrobu, mají malou polarizační závislost, nízké ztráty a snadno se zakončují optickými konektory. Vyrábí se s vazebními poměry od 50/50 až do 1/99. Vazební poměry ovlivňuje délka vazební oblasti (coupling region, fused region), vlnová délka světla a vzdálenost jader jednotlivých vláken. Viz popis níže. Vyrábí se v jednomódovém i multimódovém provedení, viz příloha 9 a 10.



Obrázek 16: FBT vazební člen jako WDM demultiplexer

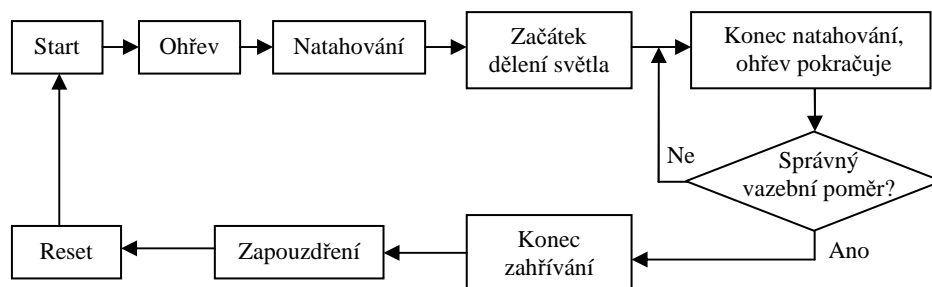
3.5.1. Výroba

Na začátku výroby vazebního členu se nejdříve vlákna očistí a zbaví jednotlivých ochran. Takto připravená vlákna se mírně zakrouť, přiblíží k sobě a začnou zahřívát. Viz obrázek č. 17. Ohřev se realizuje různými způsoby např. použitím plamene různých hořlavých plynů, CO₂ laserem [21], pomocí miniaturního elektrického topného tělesa apod. Tím se tyto vlákna spojí dohromady a při udržování absolutně přesné teploty se začnou natahovat. Natahováním se zmenšují průměry jednotlivých vláken a zároveň se mění vzdálenosti mezi jádry vláken tak, že se světelná energie může začít přesouvat z jednoho vlákna do druhého vlákna a zpět. Oblast, kde k tomuto dochází, se nazývá vazební oblast (coupling region, fused region). Viz obrázek č. 16.



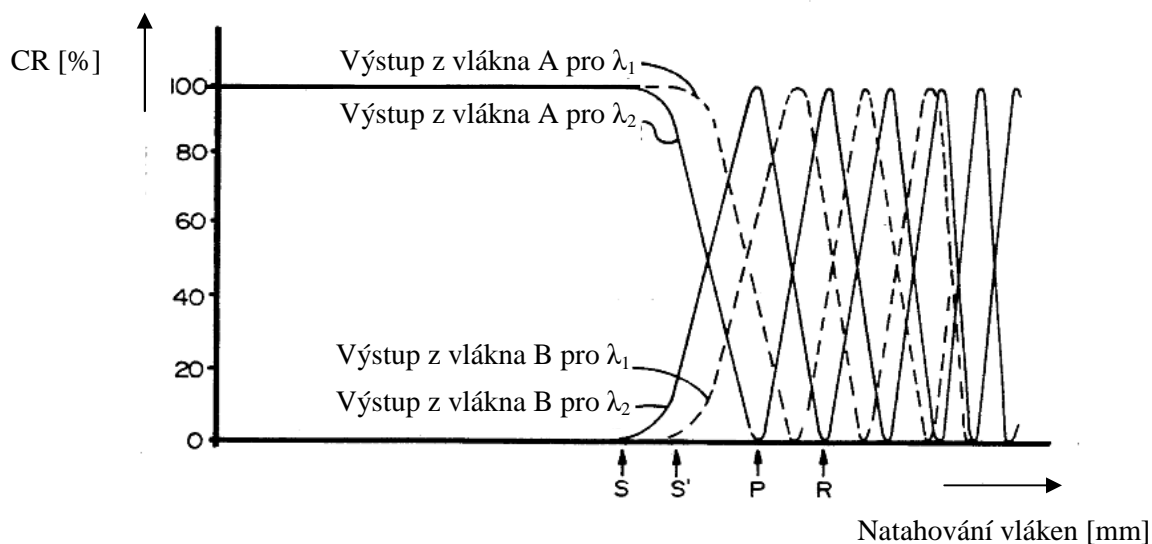
Obrázek 17: Dvě vlákna při výrobě vazebního členu FBT [4]

Dále se monitoruje výstupní výkon v jednotlivých větvích (A, B, C, D) a pomocí počítače se vyhodnocuje, zda bylo dosaženo požadovaných parametrů např. správný dělicí poměr, vložné ztráty apod. Vše se zobrazuje v reálném čase, což umožňuje řídit a zastavit jednotlivé procesy výroby (zahřívání, natahování), jakmile je dosaženo požadovaných parametrů, viz obrázek č. 18. V praxi je obvykle daná velikost vazebního poměru a podle toho se vytahováním řeší velikost vazební oblasti.



Obrázek 18: Blokové schéma procesu výroby FBT vazebních členů [6]

Velikost vazebního poměru v závislosti na míře natažení vazební oblasti při natahovacím procesu ve výrobě vazebního členu (Graf č. 2).



Graf 2: Natahovací proces při výrobě vlákna [20]

Plná čára v grafu č. 2 znázorňuje, jak světlo o vlnové délce λ_2 osciluje tam a zpět mezi dvěma výstupy A a B, v našem případě (výstup 1 a výstup 2, obrázek 15) během natahovacího procesu. Na začátku procesu tažení není vůbec žádná vazba mezi vlákny (bod S). Jakmile se však vlákno čím dál více natahuje, začíná se světlo pomalu navazovat do vlákna B. Při dalším natahování je světlo (λ_2) zcela přemístěno z vlákna A do vlákna B a ve vlákně A není žádný výkon (bod P). S dalším prodlužováním hodnota výkonu v B opět klesá a zároveň narůstá hodnota výkonu v A, až do doby, kdy je ve vlákně A 100% výkonu a v B není žádný výkon (bod R). Pro vlnovou délku λ_1 znázorněnou čárkovanou čarou se začíná objevovat vazba (bod S') až po větším natažení, než je tomu pro vlnovou délku λ_2 . U komerčních dvoukanálových vazebních členů se v natahování pokračuje, až se dosáhne požadované hodnoty vazby pro obě dvě vlnové délky, viz obrázek 18. [20]

3.6. WDM multiplexery a demultiplexery

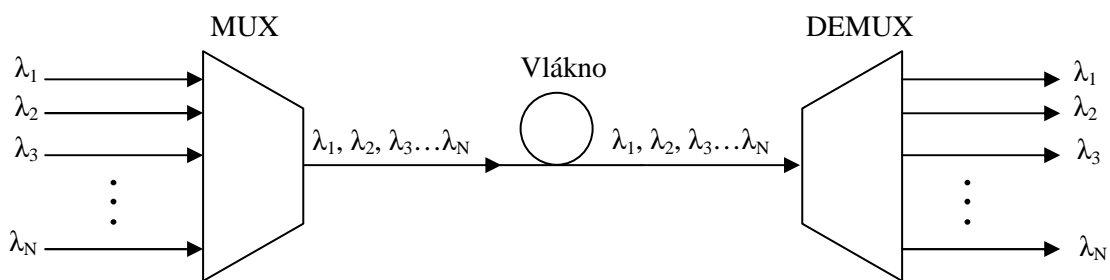
Významné uplatnění vazebních členů najdeme právě ve vlnových multiplexech, kde se využívá jejich závislosti na vlnové délce. WDM MUX umožňuje spojení signálů různých vlnových délek (různých kanálů) do jednoho vlákna, viz obrázek č. 19. WDM DEMUX umožňuje rozdělení signálu (různých kanálů) z jednoho vlákna. Můžeme se setkat stejně jako u vazních členů se symetrickými a asymetrickými prvky:

- Symetrické prvky- změním MUX na DEMUX pouze pomocí geometrického otočení chodu světla (pracují obousměrně).
- Asymetrické prvky- chovají se selektivně pouze v jednom směru.

Provedení vlnových multiplexních prvků:

- Širokopásmové- nejčastěji používané. Jednotlivé kanály mají mezi sebou velký odstup a současně zpracovávají základní komunikační vlnové délky:
 - Jednomódový režim (SM) – 1310 nm a 1550 nm.
 - Mnohomódový režim (MM) – 850 nm a 1300 nm.
 - Jedno-mnohomódový režim - jeden výstup SM a další MM (typický pro 10Gbit systémy) - 850 nm a může se použít i 1310 nm.
- Úzkopásmové (NWDM) – odstup kanálů je 200 GHz nebo více.
- Hustý multiplex WDM (DWDM) - odstup kanálů je menší než 200 GHz. Typické hodnoty 50 GHz. Používá se v přístupových pasivních optických sítích. Hustota kanálů je natolik velká, že můžeme přiřadit jednotlivým uživatelům přímo vlnovou délku, nikoli pouze časový kanál.

Pro zajímavost, abychom mohli získat přenosovou rychlost 40 Gbit.s^{-1} na 600 km trase použitím běžných systémů, potřebovali bychom 16 párů optických vláken a regenerátory umístěné každých 35 km, což dává celkem 272 regenerátorů. Na druhé straně 16-ti kanálový DWDM systém umožní totéž pomocí jednoho páru optických vláken a 4 zesilovačů, umístěných každých 120 km na 600 km trase. [16]



Obrázek 19: Přenos N kanálů současně po jednom vlákně

Parametry WDM multiplexerů a demultiplexerů:

- Počet zpracovávaných kanálů bývá běžně 4, 8, 16, 32, 40 a 48, 64 a 128 a připravuje se standardizace pro 256 kanálů. Přenosová rychlost v jednom kanálu až 40 Gbit.s^{-1} . V současné době se začíná používat rychlost 100 Gbit.s^{-1} viz literatura [12].
- Pro rozestupy kanálů se spíše používá značení ve frekvenční oblasti a vlnové délky se dopočítávají. Navazuje se zde na komunikační kanály, které jsou definované frekvenčně nikoli pomocí vlnové délky. Např. 50 GHz (0,4 nm), 100 GHz (0,8 nm), 200 GHz (1,6 nm).
- Používá se různý tvar profilu spektrální čáry buď standardní Gaussovský, nebo tzv. plochý. Plochý tvar se používá, aby bylo zajištěno nejmenší prolínání příslušného kanálu do sousedního kanálu. [8]
- Pokud je trasa delší než cca 120 km, je nutné vložit jeden či více mezilehlých zesilovačů. Zesilovač zesiluje všechny kanály najednou, plně opticky. Zesílení ovšem vede k narůstání šumu na trase a tudíž lze použít maximálně 7 mezilehlých zesilovačů bez regenerace za sebou s celkovým dosahem přibližně 640 km.
- V současnosti nejvhodnějším a také nejpoužívanějším optickým zesilovačem pro WDM je vláknový zesilovač EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier).

MUX/DEMUX lze mimo vláknově optické děliče také ještě realizovat soustavu optických filtrů, vlnovody uspořádanými do mřížky (AWG - Arrayed Waveguide Grating) nebo vláknovou Braggovou mřížkou (FBG - Fibre Bragg Grating), [17]. Detailní popis v příloze 17.

4. Realizace měřících sestav pro měření základních parametrů vláknových děličů

Další důležitou součástí této diplomové práce bylo realizovat měřící sestavy pro měření základních parametrů vláknových děličů.

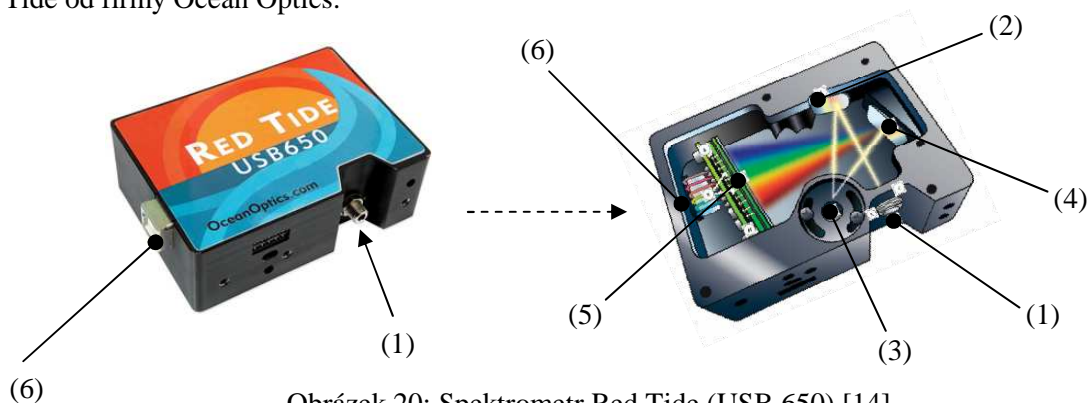
Nejprve jsem se zabýval realizací měřící sestavy pomocí monochromátoru Omni – λ 150 (příloha 16). Monochromátor je zařízení, které dokáže selektovat pouze konkrétní vlnové délky ze širokopásmového zdroje (např. žárovka). Právě navázání světla do a z monochromátoru byl hlavní problém této měřící sestavy. Vyzkoušel jsem mnoho způsobů navázání. Zkoušel jsem různé zdroje (obyčejné žárovky, halogenové žárovky, LS-1-CAL). Spolu s kombinací čoček, kolimátorů, objektivů na vstupní i výstupní straně monochromátoru, ale i přesto nebylo možné navázat do vlákna požadovaný optický výkon. Maximální hodnotu optického výkonu, kterou bylo možné dosáhnout na výstupu monochromátoru, jsem zajistil pomocí fokusování světla ze zdroje (LS-1-CAL) pomocí dvou objektivů viz příloha 13. Hodnota výkonu navázaného v SM vlákne se pohybovala okolo 8 nW (při 500 nm), což bylo pro toto měření nedostačující. Po konzultaci s dodavatelem monochromátoru jsem navrhnul použít vláknový adaptér (fiber adapter) MSZ131 (viz příloha 11), který je možné namontovat přímo na výstupní štěrbinu monochromátoru. Dále k němu optické vlákno (circular to rectangular) LLB593 (viz příloha 12) ze skla, kvůli lepší ceně, větší numerické apertuře a lepším přenosovým vlastnostem viz graf v příloze 12. Vlákno by bylo možné použít i na vstupu monochromátoru, ale pro vyšší efektivitu výrobce udává použít ještě jednu nebo dvě čočky k fokusování světla ze zdroje. Použití vlákna na výstupu, je to nejlepší možná varianta hlavně proto, že příjmový úhel vlákna je větší, než výstupní úhel světla vystupujícího z monochromátoru. Spolu s výkonnějším širokopásmovým zdrojem by to pak zajistilo velice efektivní vazbu světla do vlákna.

Po dohodě s vedoucím jsem však musel od měření pomocí monochromátoru odstoupit, kvůli dlouhým dodacím lhůtám a vysoké ceně potřebného hardwaru. Avšak co se týče měření spektrálních charakteristik pomocí monochromátoru, bylo by to dle mého názoru velice efektivní a elegantní řešení.

Pro měření základních parametrů vláknových děličů, bez použití monochromátoru jsem musel využít **jiných** měřících přístrojů a samotné měření rozdělit do **dvou částí**, aby bylo možné změřit celou spektrální charakteristiku, viz popis níže.

4.1. Realizace měřících sestav 1. část

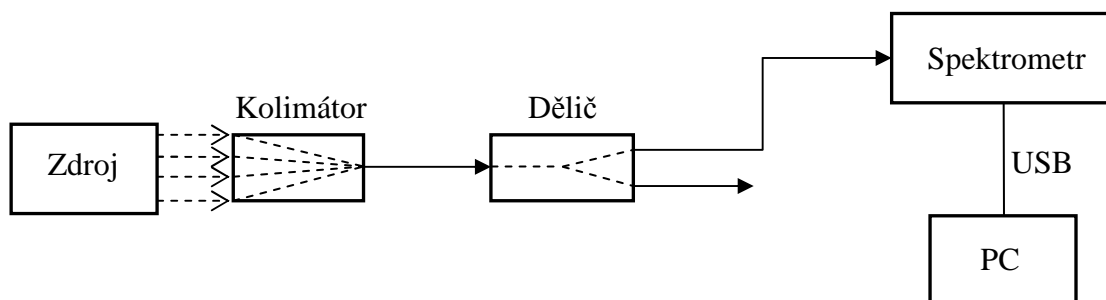
Hlavním ovlivňujícím prvkem v první části realizace měřící sestavy, byl spektrometr Red Tide od firmy Ocean Optics.



Obrázek 20: Spektrometr Red Tide (USB 650) [14]

Jedná se o kompaktní CCD univerzální spektrometr, který pokrývá spektrální pásmo **364,4 nm – 965,5 nm**. Spektrální rozlišení je přibližně 2 nm a připojení k počítači se realizuje přes rozhraní USB. Princip je založen na tom, že světlo z optického vlákna vstupuje do spektrometru vstupní štěrbinou - SMA konektor (1). Dopadá na kolimační zrcadlo (2), které fokusuje svazek světla na difrakční mřížku (3). Difrakční mřížka jej rozkládá na jednotlivé vlnové délky. Takto rozdělené světlo následně dopadá na další fokusující zrcadlo (4), které je zaostřuje a směřuje na lineární CCD detektor (5), viz obrázek č. 20. Signál z CCD detektoru je převeden do počítače a pomocí dodávaného software je zobrazen patřičný spektrální průběh. [13]

Dále jsem v této části používal širokopásmový halogenový zdroj LS-1-CAL kalibrovaný pro vlnové délky 300 nm – 1050 nm s kolimátorem a adaptérem SMA-FC na výstupu (foto viz příloha 14). Světlo ze zdroje jsem navázal do referenčního SM vlákna, abych zachoval stejný výkon ve vláknech. Toto referenční vlákno jsem následně spojoval s příslušnými měřenými porty (vstupy/výstupy) měřeného vláknového děliče, konkrétní výstupy jsem pak připojoval pomocí SMA-FC adaptéru ke spektrometru. Proměřil jsem všechny porty z obou stran tzv. každý s každým. Spektrometr jsem připojil pomocí USB kabelu k PC a pomocí dodávaného softwaru Safibra Das 2.0 jsem změřil příslušné spektrální charakteristiky. Měřící sestava je blokově znázorněna na obrázku č. 21.



Obrázek 21: Sestava pro měření vláknových děličů 1. část

4.2. Realizace měřících sestav 2. část

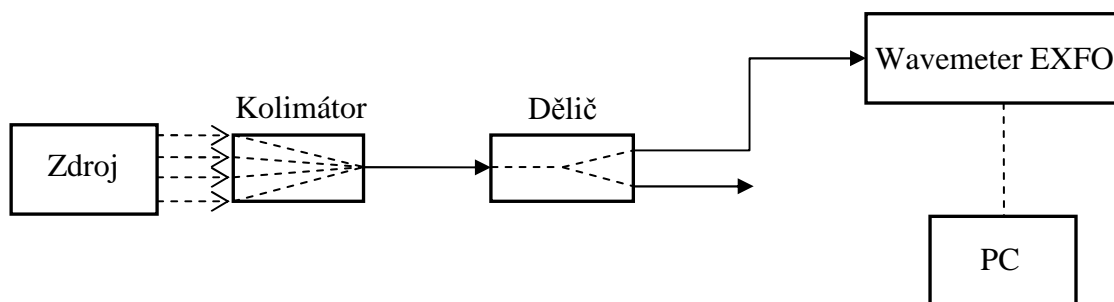
Jak jsem uvedl výše, v první části měření jsem použil spektrometr Red Tide, který pokrývá spektrální pásmo 364,4 nm – 965,5 nm. Z tohoto důvodu jsem pro delší vlnové délky musel použít jiný měřicí přístroj. Jediný přístroj, který byl k dispozici a vyhovoval požadovaným parametrům, byl měřič vlnových délek EXFO WA-7600 (Multi-line Wavemeter Optical Channel Analyzer), viz obrázek č. 22.



Obrázek 22: Měřič vlnových délek EXFO WA-7600 [15]

Jedná se přístroj, který mimo jiné umožňuje současně měřit optické výkony na jednotlivých vlnových délkách a celkový optický výkon. Vlnové délky se měří s přesností na ± 0.2 pm. Používá skenovací technologii založenou na Michelsonovu interferometru k určení absolutní vlnové délky testovaného optického signálu, porovnáváním se zabudovaným referenčním HeNe laserem. Použitým jako standart pro vlnové délky. Spektrální pásmo tohoto přístroje je od 1265 nm do 1680 nm [15]. Jak si můžeme všimnout, vzniká zde mezera mezi 1000 nm (maximální rozsah spektrometru) a 1265 nm (minimum u měřiče vlnových délek), kterou nedokážeme změřit. V našem případě je však tato skutečnost nevyhnutelná a můžeme si dovolit ji zanedbat.

Měřič vlnových délek neobsahuje USB konektor pro propojení s počítačem. Výsledné hodnoty bylo možné ukládat na disketu, takovéto řešení pak s sebou přinášelo velkou časovou neefektivnost. Hlavně pro měření, které jako v mém případě obsahovalo velké množství dat. Na následujícím obrázku č. 23 je zobrazeno blokové schéma měřící sestavy používané v této druhé části měření.



Obrázek 23: Sestava pro měření vláknových děličů 2. část

Většina přístrojů včetně použitého zdroje zůstala stejná, jako v první části měření. Hlavní rozdíl spočíval v tom, že na místo spektrometru, zde byl použit měřič vlnových délek (Wavemeter EXFO). Výsledkem v této části měření nebyly spektrální charakteristiky, jako u měření pomocí spektrometru, nýbrž hodnoty jednotlivých výkonů pro dané vlnové délky. Měření jsem prováděl od 1265 nm do 1685 nm po 10 nm. Naměřené hodnoty jsem ukládal na diskety a přenášel do počítače. V ojedinělých případech však docházelo k tomu, že výkon v některém portu byl příliš malý a hodnoty bylo nutné odečítat ručně jednu po druhé (například dělič 2 mezi větvemi 13). V případě děliče 3 při měření větve 12 byl výkon natolik nízký, že nebylo možné vůbec ani odečítat hodnoty ručně. V tomto případě jsem byl schopný změřit pouze hodnoty pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm a to pomocí jiného zdroje. Jednalo se o laserový zdroj OLS2 DUAL od firmy AFL Telecommunication operující právě na zmíněných vlnových délkách nebo v jejich blízkém okolí.

V této práci nás nejvíce zajímají spektrální charakteristiky jednotlivých **základních parametrů** vláknově optických děličů. Jako jsou **vazební poměr, vložné ztráty, homogenita ztrát** (pro 1. a 4. dělič) a **celkové ztráty**, viz kapitola 5.

4.3. Typy použitých děličů

Spektrální charakteristiky jsem měřil celkem pro čtyři různé SM vláknové děliče od firmy Optokon v kovovém pouzdru. Jednalo se o tyto typy:

1. **SFT-S035-1x02-50-CM1-SPC-SPC** - vláknový dělič v provedení 1x2, viz obrázek č. 24 s vazebním poměrem **50/50 %** (foto viz příloha 5). Výrobce pro tento typ děličů udává pracovní vlnové délky 1310 ± 40 nm a 1550 ± 80 nm. Celkové ztráty 0,2 dB, homogenita ztrát $\leq 0,8$ dB, vložné ztráty 3,6 dB, vazební poměr > 40 %, směrovost > 50 dB, útlum zpětného odrazu > 50 dB a PDL $< 0,15$ dB, viz příloha 1.

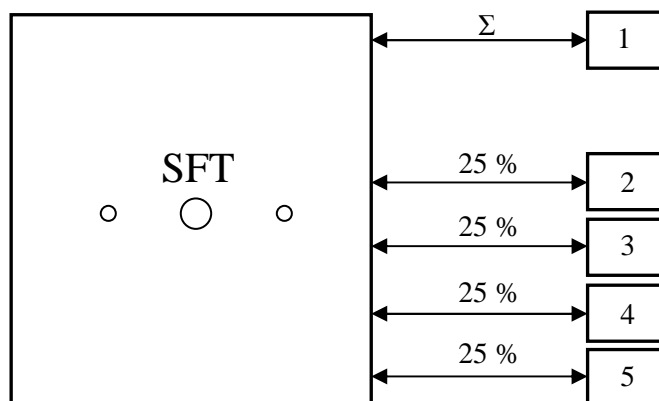


1, 2, 3 – vstupní/ výstupní FC konektory

Obrázek 24: Blokové schéma měřeného SFT-1x2 děliče [příloha 1]

2. **SFT-S035-1x02-30-CM1-SPC-SPC** - provedení stejné jako předchozí dělič 1x2, viz obrázek č. 24, vazební poměr **30/70 %** (foto viz příloha 6). Výrobce pro tento typ děličů udává pracovní vlnové délky 1310 ± 40 nm a 1550 ± 80 nm. Celkové ztráty jsou 0,2 dB, vložné ztráty 6,2 / 1,9 dB, směrovost > 50 dB, útlum zpětného odrazu > 50 dB a PDL $< 0,35$ dB, viz příloha 1.
3. **SFT-S035-1x02-10-CM1-SPC-SPC** - provedení stejné jako předchozí děliče 1x2, viz obrázek č. 24, vazební poměr **10/90 %** (foto viz příloha 7). Výrobce pro tento typ děličů také udává pracovní vlnové délky 1310 ± 40 nm a 1550 ± 80 nm. Celkové ztráty jsou 0,2 dB, vložné ztráty 11,7 / 0,7 dB, směrovost > 50 dB, útlum zpětného odrazu > 50 dB, PDL $\leq 0,15$ dB, viz příloha 1.

4. **SFT-S035-1x04-25-CM3-SPC-SPC** - vláknový dělič v provedení 1x4, viz obr. č. 25. Vazební poměr **4 x 25 %** (foto viz příloha 8). Výrobce pro tento typ děličů stanovil pracovní vlnové délky 1310 ± 40 nm a 1550 ± 80 nm. Vložné ztráty jsou 7,3 dB, homogenita ztrát 1 dB, směrovost > 50 dB a $PDL \leq 0,15$ dB, viz příloha 2.



1, 2, 3,4,5 – vstupní/ výstupní FC konektory

Obrázek 25: Blokové schéma měřeného SFT-1x4 děliče [příloha 2]

Všechny výše uvedené hodnoty byly čerpány z katalogových údajů od firmy Optokon a z originálních výsledků testů těchto vláknových děličů (příloha 3 a 4). Výrobce udává tyto hodnoty pro vlnové délky **1310 ± 40 nm a 1550 ± 80 nm**. Pokud budeme chtít tyto součástky používat i pro jiné vlnové délky, než jsou tyto výše uvedené, můžeme se setkat se zcela odlišnými výsledky.

Právě tato skutečnost je jedním z cílů této diplomové práce, kdy potřebujeme zjistit, jak odlišně se tyto vláknové děliče chovají pro jiné vlnové délky a zda je eventuálně možné je pro jiné vlnové délky vůbec používat.

Všechny zjištěné hodnoty z obou dvou částí měření jsem vyhodnotil, zpracoval do grafů a popsal v následující kapitole.

5. Spektrální charakteristiky 1. část

V této kapitole se zabývám vlastním zpracováním naměřených hodnot pomocí spektrometru Red Tide. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v chronologickém sledu v jednotlivých podkapitolách, které korespondují s výše uvedeným seznamem použitých děličů, popisujícím výrobcem udávané parametry atd. (viz podkapitola 4.3).

Při zpracování hodnot jsem zjistil, že všechny čtyři děliče se chovají až na drobné výjimky stejně pro oba směry měření (jsou **obousměrné**). Není tedy nutné uvádět v této práci stejné hodnoty opakovaně pro oba směry měření. Nicméně pro názornost uvádím příklad porovnání změřených hodnot pro dělič 30/70 z obou stran do přílohy 18_a. Příloha 18_b znázorňuje vypočítané hodnoty vložných ztrát pro tyto změřené hodnoty. Všechny zbývající charakteristiky jsem uvedl do příloh na CD.

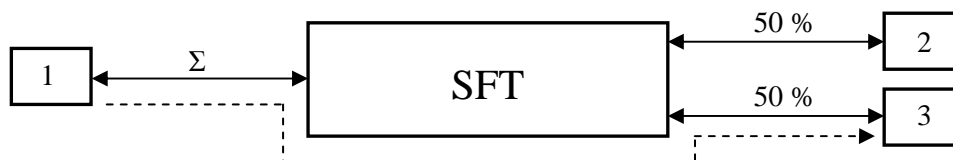
Tato práce vychází z velkého množství naměřených a vypočítaných hodnot. Zdrojové naměřené hodnoty (surová data) jsem proto uložil na přiložené CD. V samotné práci jsou pak uvedeny pro nás podstatnější vypočítané a graficky zpracované výše uvedené **základní parametry** vláknově optických děličů. (viz podkapitola 4.2).

Aby bylo možné přesněji měřit jednotlivé spektrální charakteristiky, můžeme na spektrometru nastavit větší integrační čas resp. zvětšit dobu, po kterou se měří intenzita dopadajícího světla. Chceme-li však v tomto případě porovnávat množství vstupujícího a vystupujícího světla, musíme buď měřit všechno při stejném integračním čase, nebo musíme výsledné hodnoty dělit podílem integračních časů.

Pokud například změříme vstupní signál při integračním čase 100 ms a výstupní signál při 3000 ms. Musíme hodnoty pro výstupní signál dělit 30-ti (3000/100), protože výstupní signál je změnou integračního času 30krát zesílen. Touto cestou dosáhneme přesnějšího a zároveň odpovídajícího měření. Vzor výpočtu jednotlivých hodnot jsem uvedl do podkapitoly 5.1.1.

5.1. Dělič SFT-S035-1x02-50-CM1-SPC-SPC

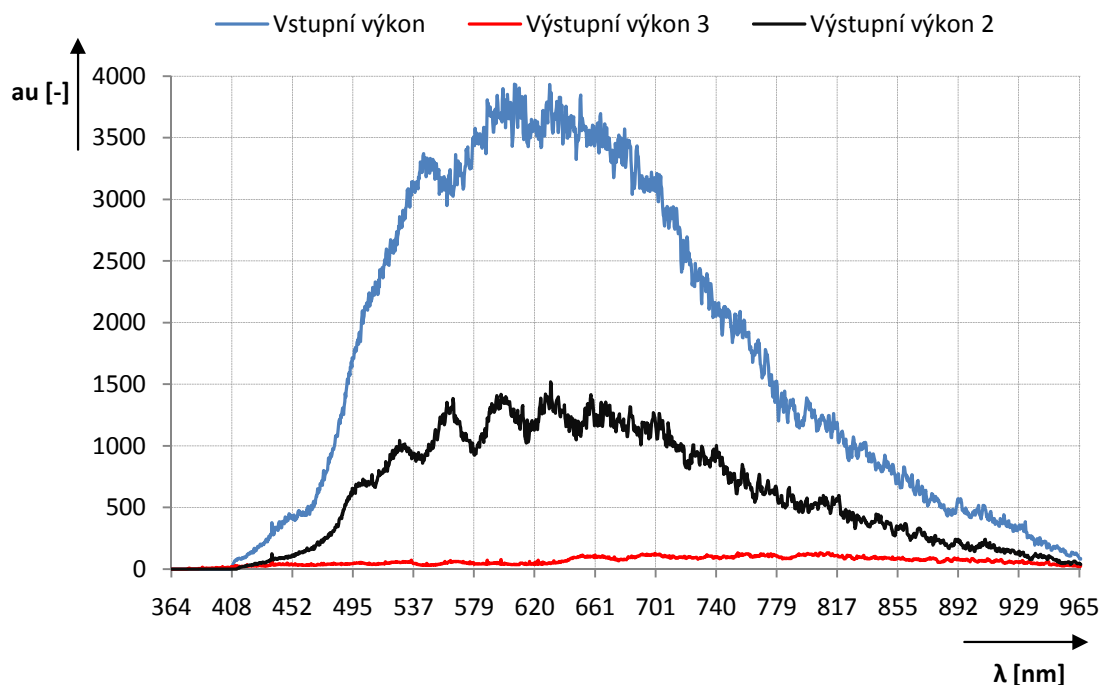
Prvním děličem, který jsem měřil, byl tzv. 3dB dělič a měl by mít v každé větvi 50 % celkového vstupního výkonu.



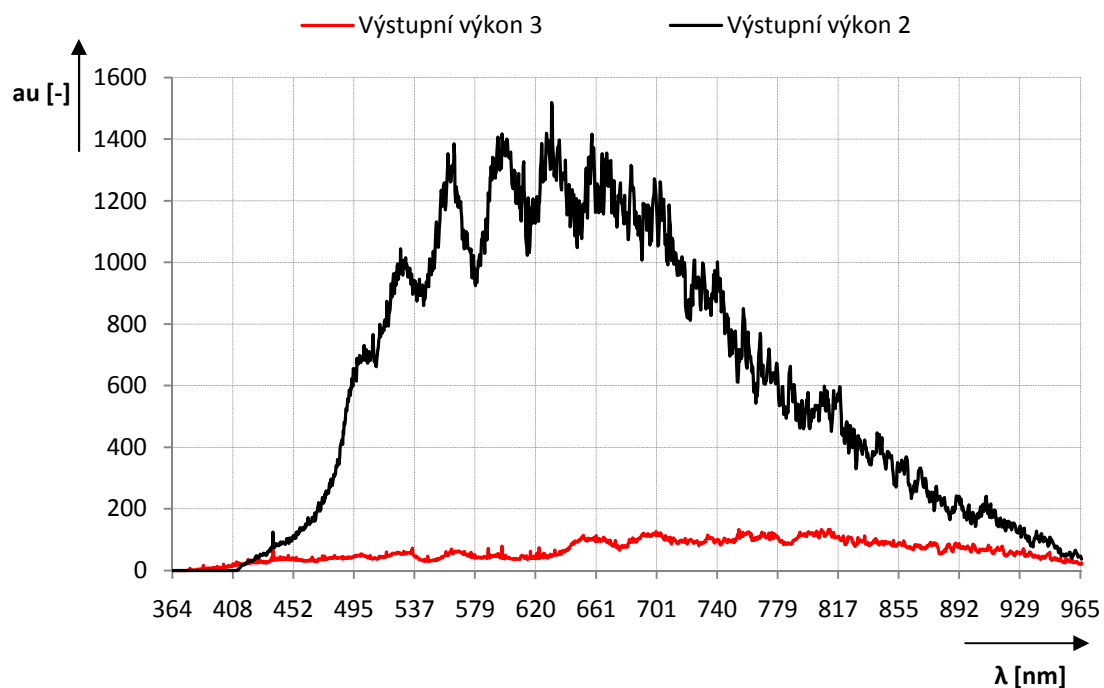
Obrázek 26: Blokové schéma rozdělení výkonů SFT-1x2 děliče

Značení portů jsem zvolil pro přehlednost tak, jak je uvedeno výše na obrázku č. 26. Pokud měříme mezi vstupem **1** a výstupem **3** (znázorněno čárkovanou šipkou) označuji toto měření jako **13** apod. Stejné značení používám u **všech děličů** popsaných v této práci.

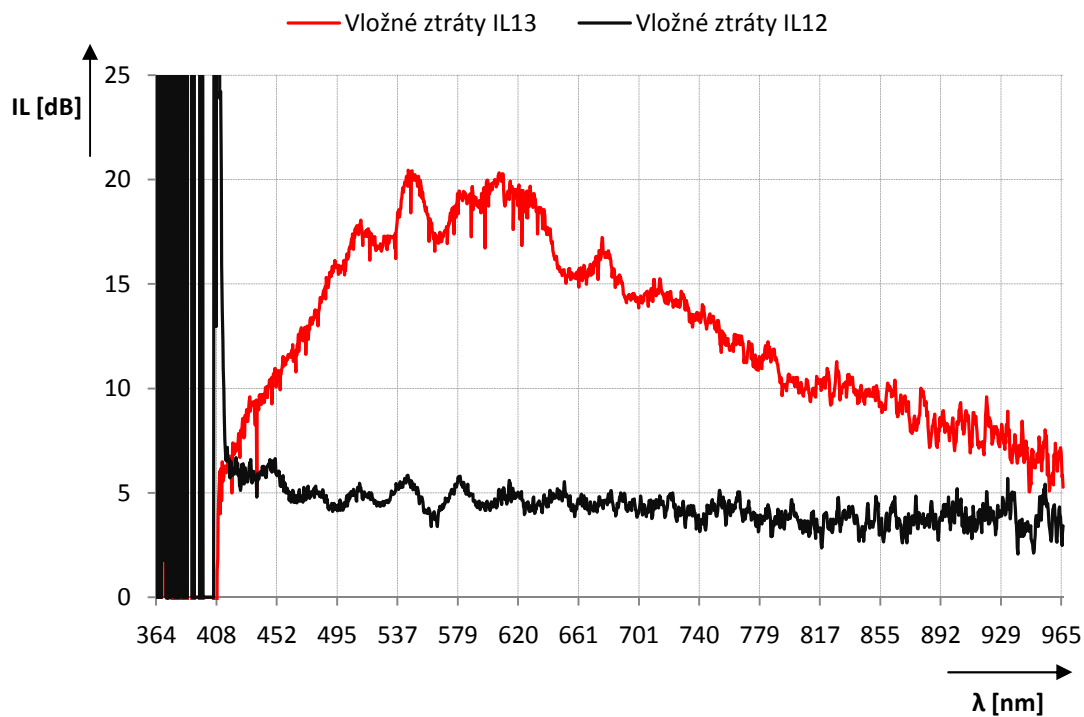
Graf č. 3: Porovnání vstupního výkonu s výstupními výkony ve větvích 2 a 3



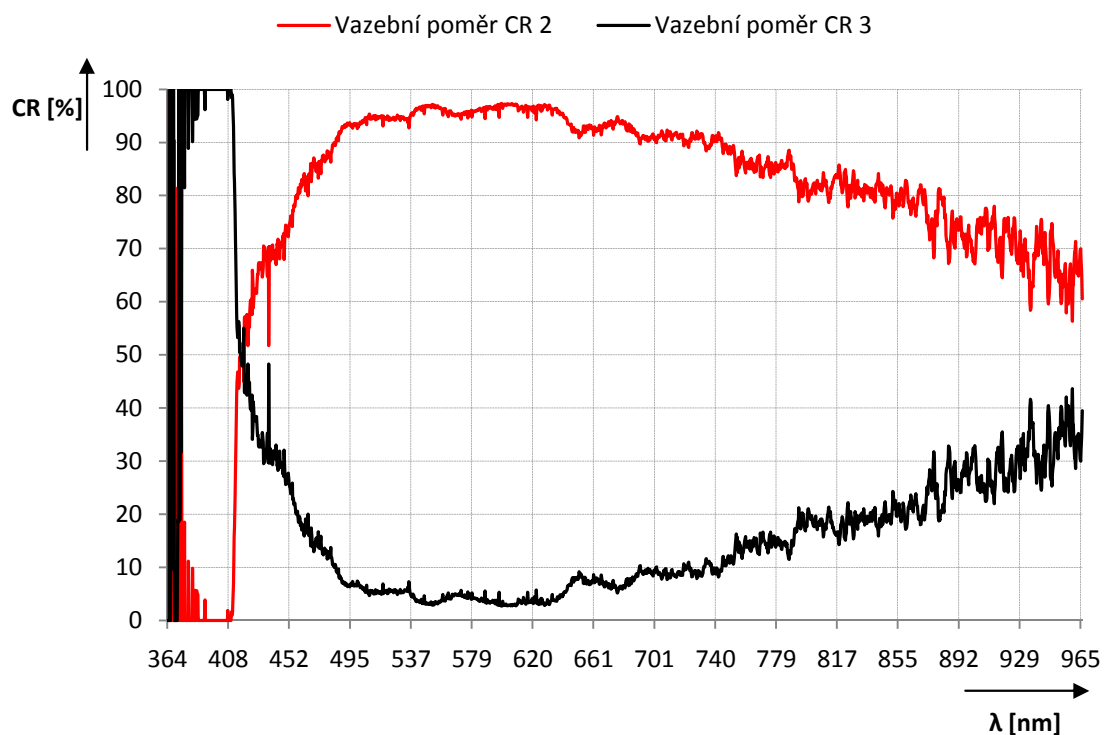
Graf č. 4: Rozdělení vstupní výkon ve výstupních větvích 2 a 3



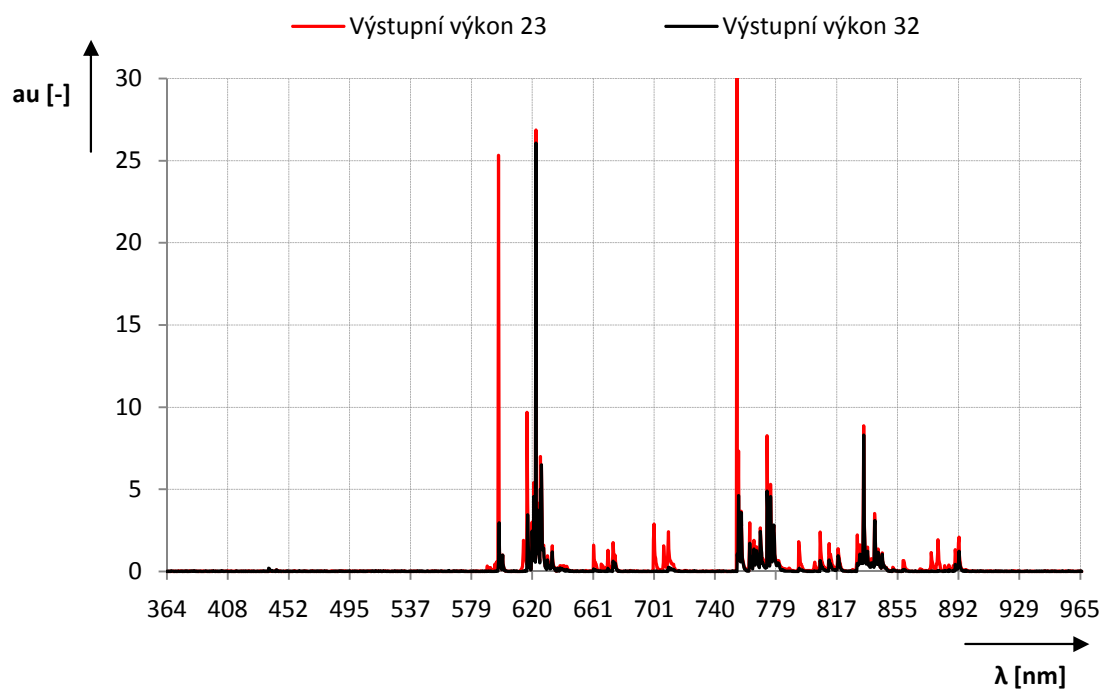
Graf č. 5: Vložné ztráty mezi větvemi 12 a 13



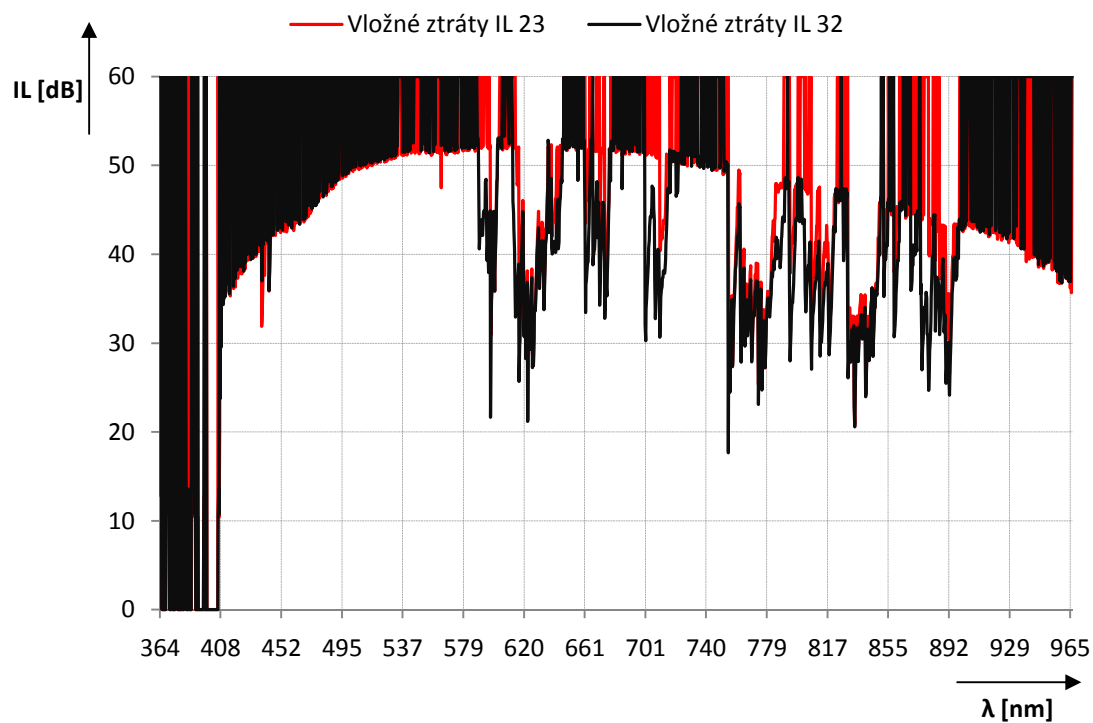
Graf č. 6: Vazební poměr ve dvou větvích 2 a 3



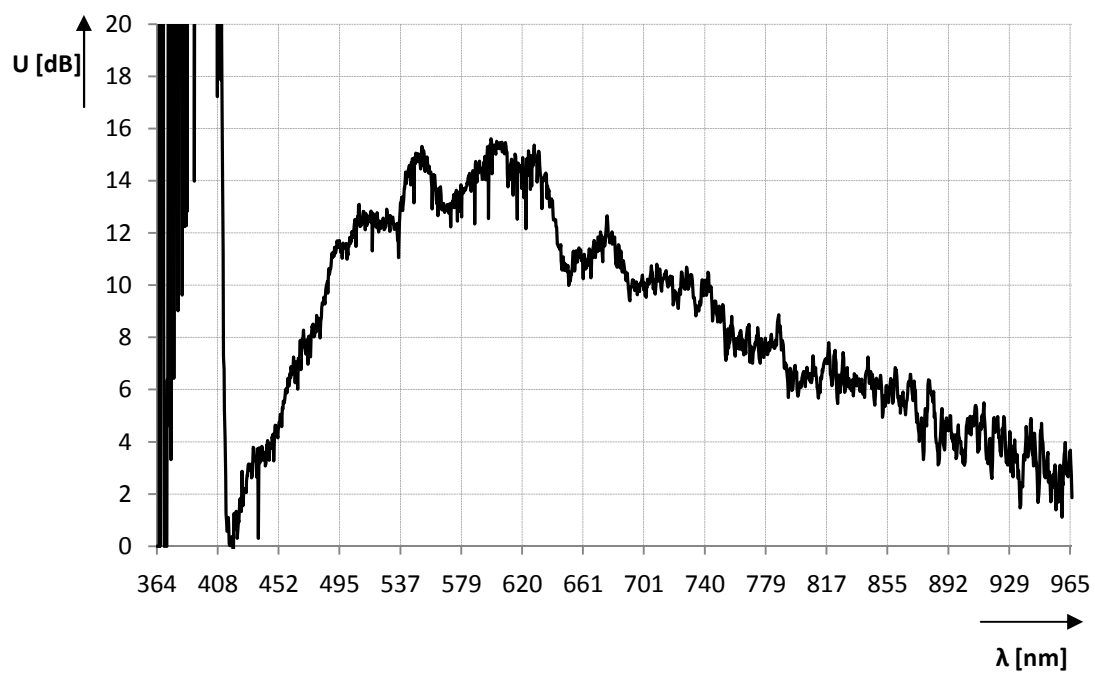
Graf č. 7: Naměřený výkon mezi větvemi 23 a 32



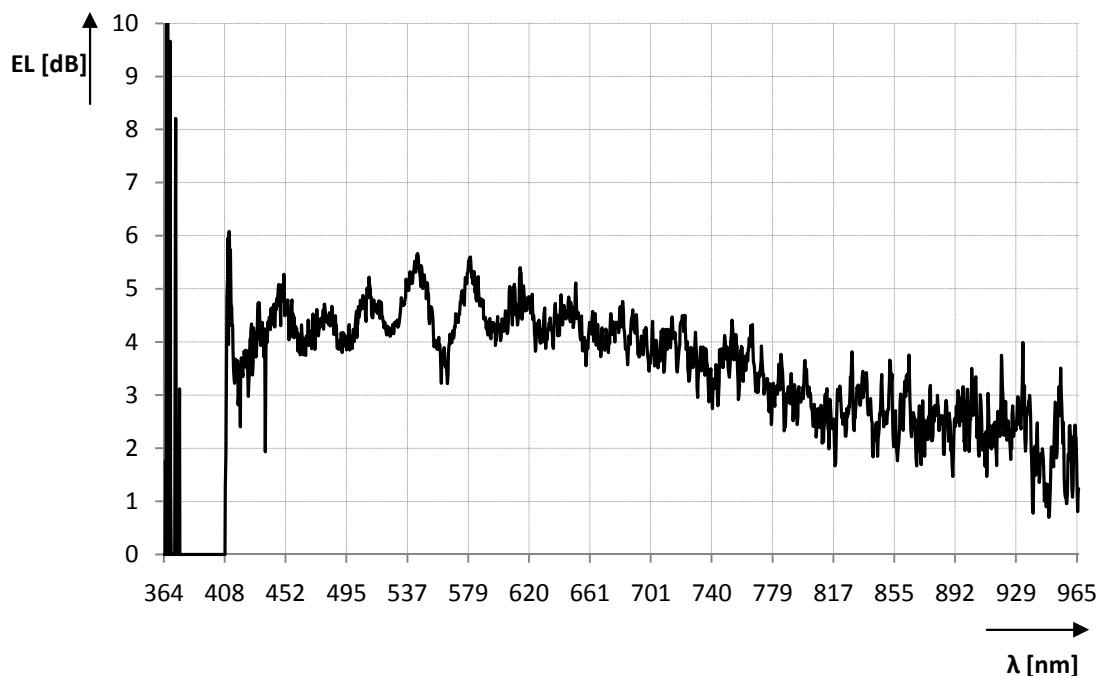
Graf č. 8: Vložné ztráty mezi větvemi 23 a32



Graf č. 9: Homogenita ztrát (ideálně nulová)



Graf č. 10: Celkové ztráty



Z výše uvedených naměřených a vypočítaných charakteristik je patrné, že spektrometr pokrývající spektrální pásmo 364,4 nm – 965,5 nm, dokázal objektivně měřit až od vlnové délky větší než 408 nm. Při menších vlnových délkách spektrometr změřil nulové nebo minimální hodnoty, které po dosazení do vzorců uvedených ve vzoru výpočtu (kapitola 5.1.1), samozřejmě způsobují vysoké nebo naopak nulové hodnoty, znázorněné v grafech mezi vlnovou délkou 364 nm a 408 nm. Tato skutečnost platí i pro měření ostatních děličů, které jsou zhodnoceny v následujících kapitolách.

5.1.1. Vzor výpočtu pro první dělič SFT-S035-1x02-50

Výpočty jsem provedl pro všechny vlnové délky 364,36 nm – 965,49 nm (rozsah spektrometru). V tomto vzoru výpočtu uvádím pro zjednodušení příklad pouze pro jednu vlnovou délku tj. 850,2 nm.

Výpočet **vložných ztrát IL** mezi větvemi 1 a 2 (viz obrázek 26), dosazením naměřených hodnot do vzorce č. 2.4:

$$IL_{12}(850,2 \text{ nm}) = -10 \log \frac{P_2(850,2 \text{ nm})}{P_{IN}(850,2 \text{ nm})} = -10 \log \frac{369,08}{800,42} = \underline{\underline{3,3619 \text{ dB}}}$$

Výpočet **vazebního poměru CR** mezi větvemi 2 a 3 dosazením do vzorce č. 2.1:

(Pro větev 2)

$$CR(850,2 \text{ nm}) = -10 \log \frac{P_{12}(850,2 \text{ nm})}{P_{12}(850,2 \text{ nm}) + P_{13}(850,2 \text{ nm})} \cdot 100 = \frac{369,08}{369,08 + 85,163} \cdot 100 = \underline{\underline{81,252 \%}}$$

(Pro větev 3)

$$CR(850,2 \text{ nm}) = -10 \log \frac{P_{13}(850,2 \text{ nm})}{P_{12}(850,2 \text{ nm}) + P_{13}(850,2 \text{ nm})} \cdot 100 = \frac{85,163}{369,08 + 85,163} \cdot 100 = \underline{\underline{18,748 \%}}$$

Výpočet **homogenity ztrát U** dosazením do vzorce č. 2.7 (2.8):

$$U(850,2 \text{ nm}) = IL_{MAX}(850,2 \text{ nm}) - IL_{MIN}(850,2 \text{ nm}) = 9,731 - 3,369 = \underline{\underline{6,362 \text{ dB}}}$$

Výpočet **celkových ztrát EL** dosazením do vzorce č. 2.3:

$$\begin{aligned} EL(850,2 \text{ nm}) &= -10 \log \frac{\sum_{n=0}^i P_{OUT,n}}{P_{IN}} = -10 \log \frac{P_{12}(850,2 \text{ nm}) + P_{13}(850,2 \text{ nm})}{P_{IN}(850,2 \text{ nm})} = \\ &= -10 \log \frac{369,08 + 85,163}{800,42} = -10 \log \frac{454,243}{800,42} = -10 \log 0,5675 = \underline{\underline{2,46 \text{ dB}}} \end{aligned}$$

Stejné výpočty jsem použil i pro následující tři děliče. Z tohoto důvodu uvádím vzor výpočtu pouze pro tento dělič (50/50).

5.1.2. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x02-50-CM1-SPC-SPC

Pokud se podíváme na graf č. 3, můžeme si všimnout, že na výstupu 2 je téměř polovina vstupního výkonu, což bychom očekávali. Na výstupu 3 bychom chtěli mít také polovinu výkonu, ale není tomu tak. V grafu č. 4 je jasně vidět jaký je rozdíl mezi výkonem na výstupu 2 a na výstupu 3. Výkon světla navázaného na výstup 3 je přibližně 10krát menší než je tomu na výstupu 2.

Z grafu č. 5 je vidět, že vložné ztráty jsou velice závislé na použité vlnové délce světla a také se zvyšující se vlnovou délkou klesají, nejvíce to platí pro výstup 3. Nejvyšší vložné ztráty pro výstup 3 byly dosaženy při vlnových délkách cca 500 – 650 nm a jejich hodnota byla cca 20 dB. Pro výstup 2 se hodnota vložných ztrát pohybovala okolo 3 – 6 dB opět v závislosti na vlnové délce.

Dělicí (vazební) poměr CR jsem pro přehlednost uvedl v procentech v grafu č. 6 a je z něj velice pěkně vidět jak se mění vazební poměr v závislosti na vlnové délce. Pro vlnovou délku 850,2 nm je dělicí poměr 81,252/18,748 % viz vzor výpočtu.

Co se týče výkonu mezi výstupy 2 a 3 ukázalo se, že projde pouze malá část světla o vlnové délce cca 620 nm a 750 nm, viz graf č. 7. Nejmenší vložné ztráty jsem vypočítal 17,65 dB při vlnové délce 754 nm. Ostatní hodnoty byly větší než 20 dB jak je vidět z grafu č. 8. Tyto hodnoty jsou odpovídající, protože vložné ztráty mezi výstupy děliče by měli být co největší resp. světlo navázané do výstupu 2, by se vůbec nemělo objevit ve výstupu 3 a naopak.

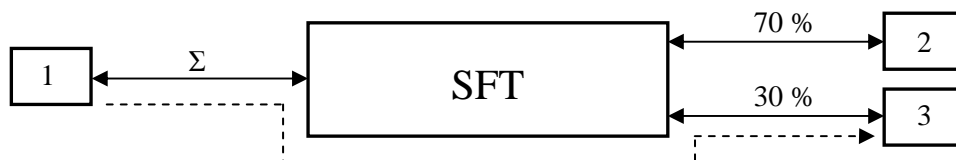
Homogenita ztrát znázorněná v grafu č. 9 by měla být co nejmenší a jelikož vyplývá z vložných ztrát, je také závislá na vlnové délce. Můžeme si všimnout, že je nejhorší (největší) opět pro vlnové délky okolo 500 – 650 nm.

Celkové ztráty tohoto děliče jsou znázorněny v grafu č. 10. Největší naměřená hodnota byla 6,079 dB pro vlnovou délku 411 nm a nejmenší naměřená hodnota 0,697 dB pro vlnovou délku 948 nm.

Z grafů je opravdu jasně vidět, jak je tento dělič silně závislý na vlnové délce světla. Pokud bychom jej chtěli použít například pro vlnovou délku 850,2 nm, musíme počítat s tím, že dělicí poměr nebude 50/50% nýbrž 81,25/18,75% apod. To stejné platí i pro ostatní výše uvedené parametry.

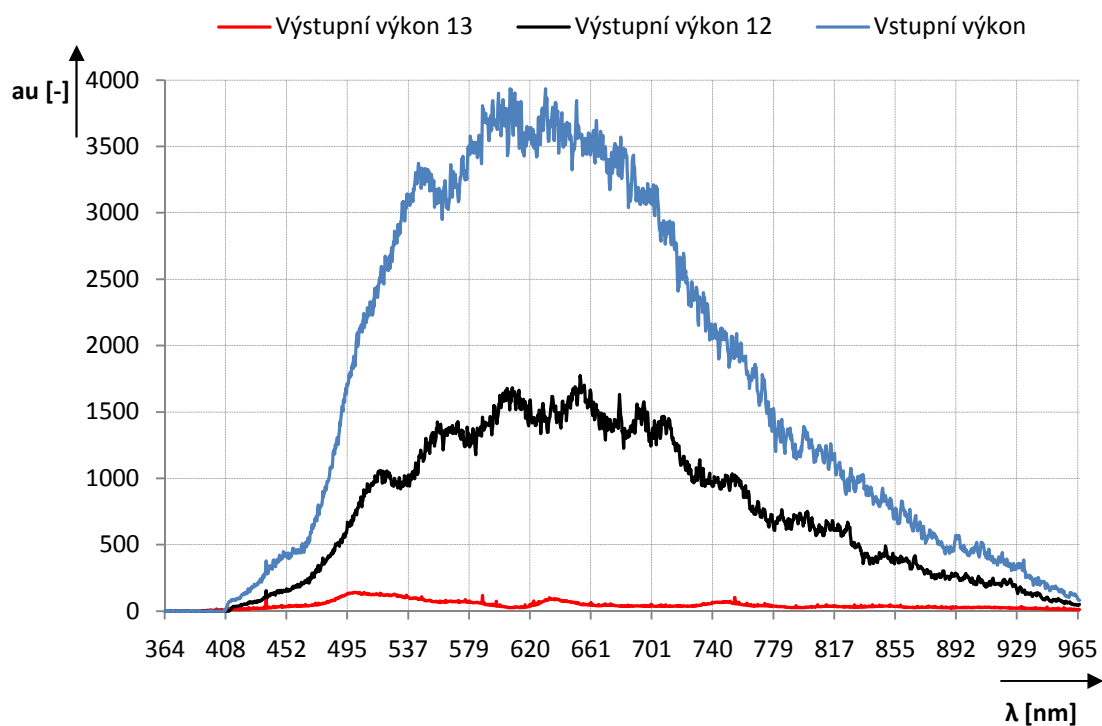
5.2. Dělič SFT-S035-1x02-30-CM1-SPC-SPC

Druhý měřený dělič, by měl mít v jedné větvi 30 % z celkového vstupního výkonu a ve druhé 70 %. Tak jak je uvedeno na obrázku č. 27.

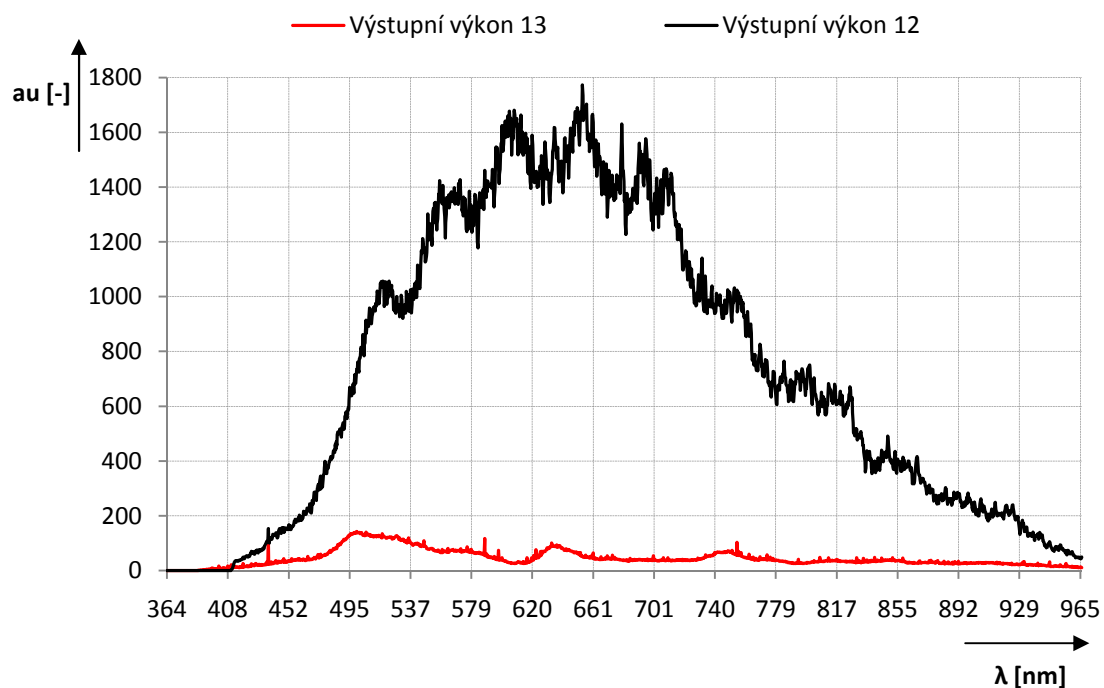


Obrázek 27: Blokové schéma rozdělení výkonů SFT-1x2 děliče

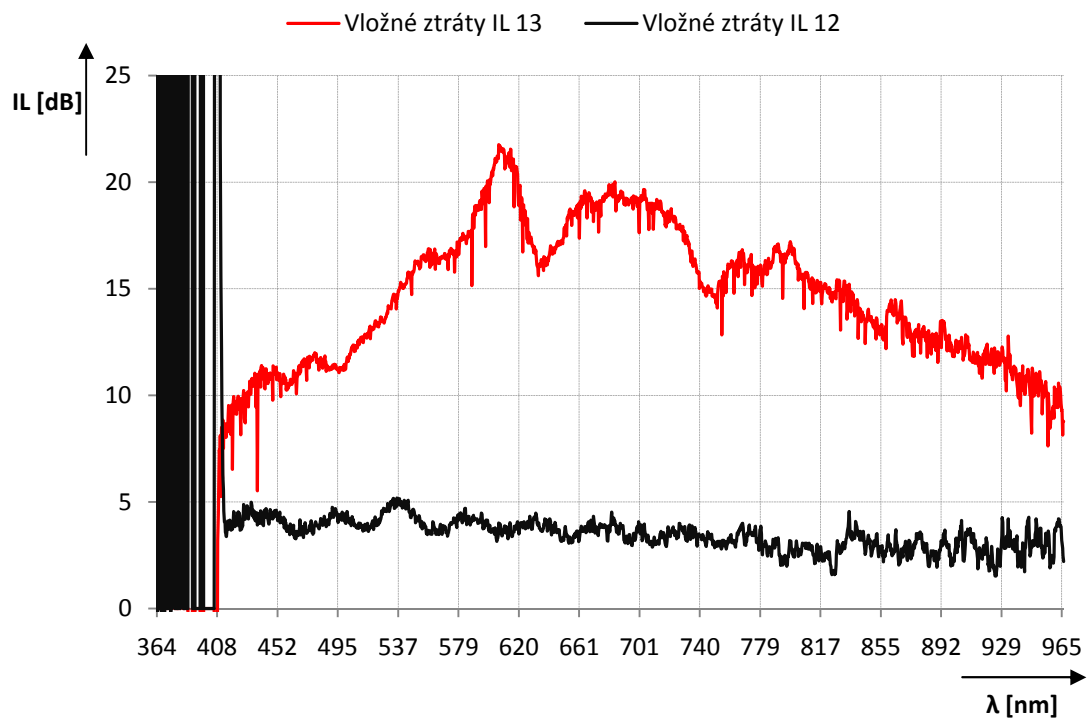
Graf č. 11: Porovnání vstupního výkonu s výstupními výkony ve větvích 2 a 3



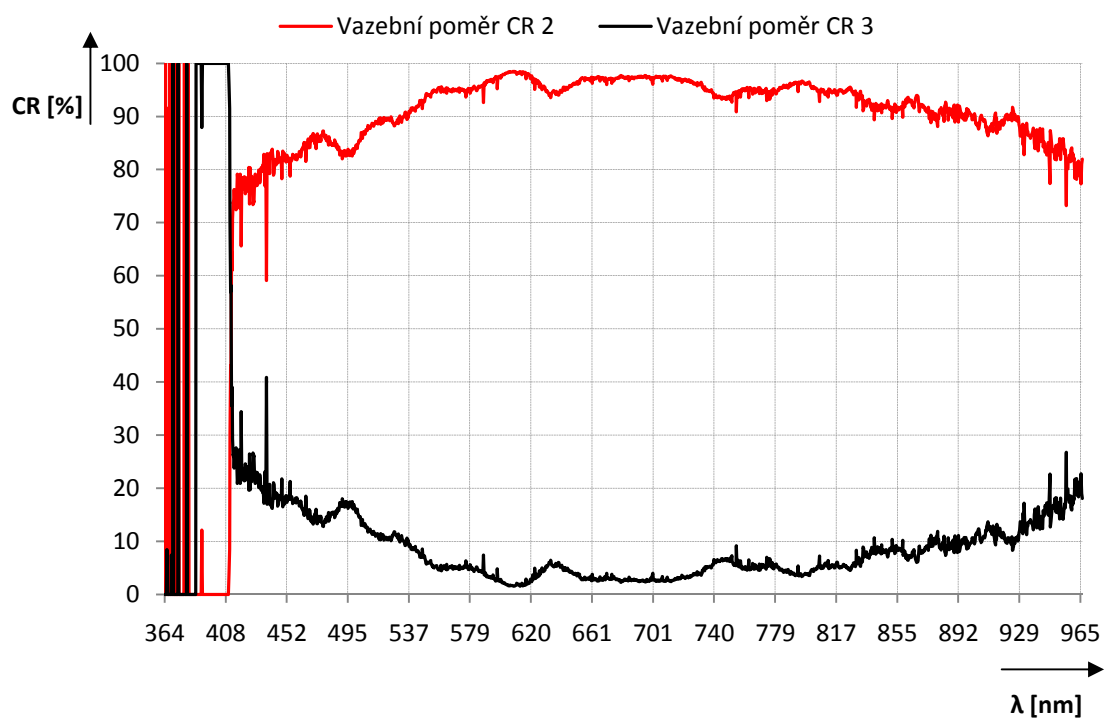
Graf č. 12: Rozdělení vstupní výkon ve výstupních větvích 2 a 3



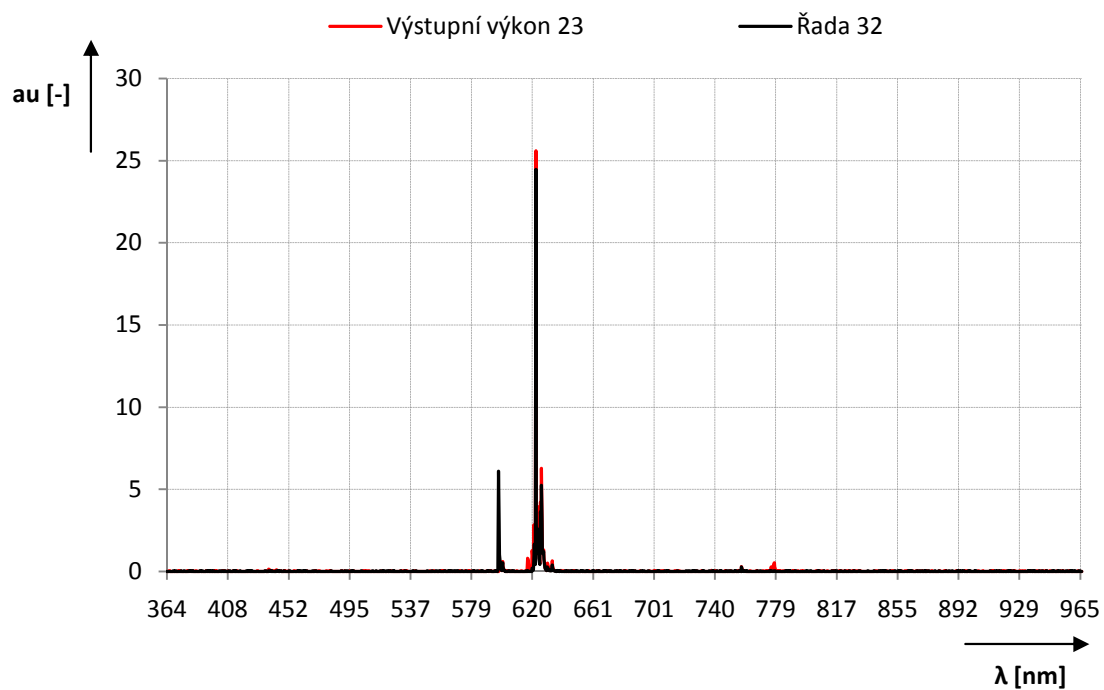
Graf č. 13: Vložné ztráty mezi větvemi 12 a 13



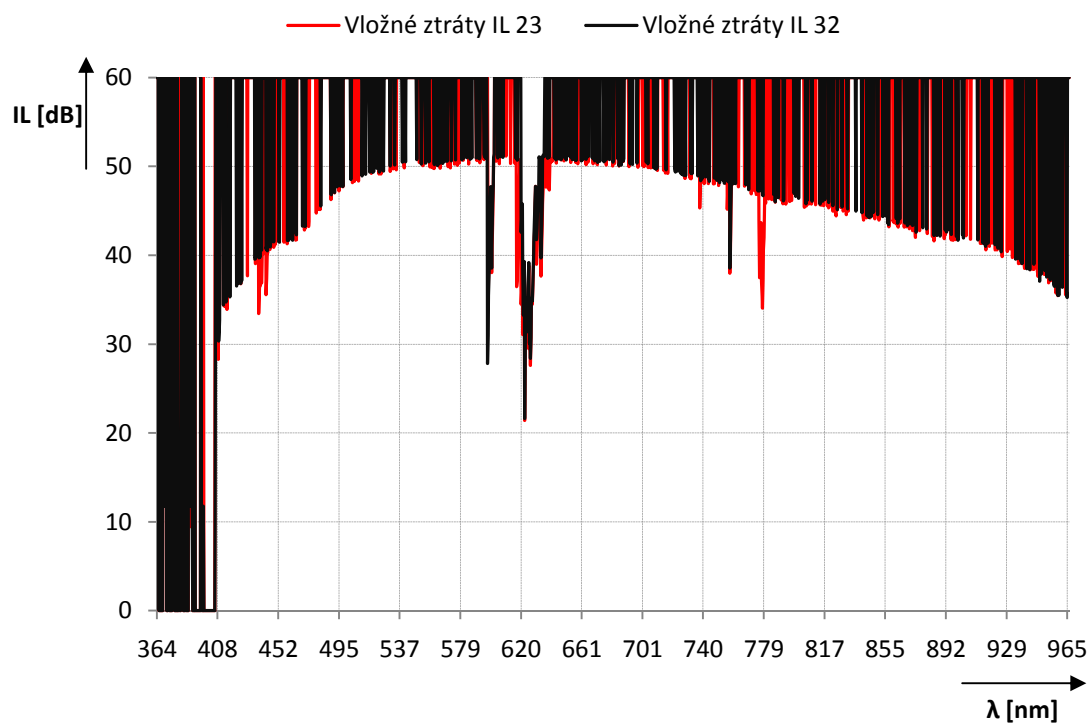
Graf č. 14: Vazební poměr ve dvou větvích 2 a 3



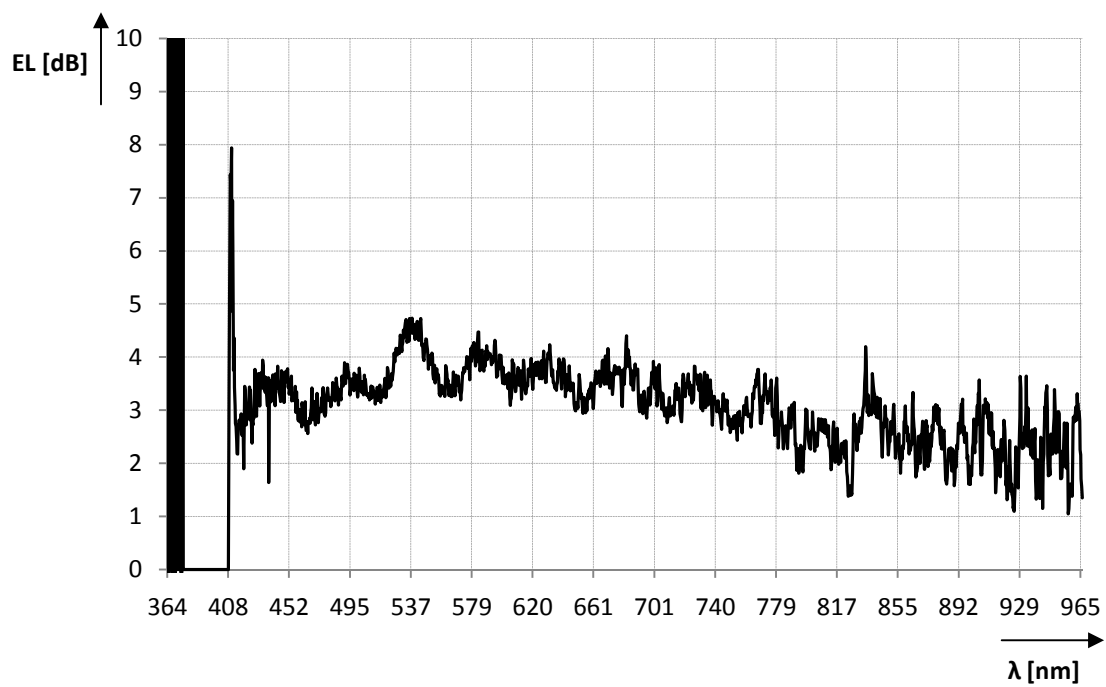
Graf č. 15: Naměřený výkon mezi větvemi 23 a 32



Graf č. 16: Vložné ztráty mezi větvemi 23 a 32



Graf č. 17: Celkové ztráty



5.2.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x02-30-CM1-SPC-SPC

Podíváme-li se na graf č. 11, vidíme, že je na výstupu 2 téměř polovina vstupního výkonu stejně jako u předchozího děliče. V případě výstupu 3 opět pozorujeme velice nízké hodnoty. Z grafu č. 12 lze vidět, jaký je rozdíl mezi výkonem na výstupu 2 a na výstupu 3.

V grafu č. 13 jsou znázorněny vložné ztráty, které jsou podobné jako u 3dB děliče. Nejvyšší hodnoty vložných ztrát pro výstup 3 bylo dosaženo při vlnových délkách cca 580 – 700 nm a to cca 20 dB. Z toho vyplývá, že ve výstupu 3 je pro tyto vlnové délky navázána jen přibližně setina vstupního světla. Pro výstup 2 se hodnota vložného útlumu pohybovala pod 5 dB opět v závislosti na vlnové délce.

Dělicí (vazební) poměr CR jsem pro přehlednost uvedl v procentech v grafu č. 14 a je z něj patrné jak se mění vazební poměr v závislosti na vlnové délce. Pro vlnovou délku 850,2 nm je dělicí poměr 91,383/8,617 %. Srovnáme-li tento graf s grafem č. 6 neboli s vazebním poměrem 3 dB děliče. Zjistíme, že se i v tomto případě při vyšších vlnových délkách křivka blíží k výrobcem udávanému vazebnímu poměru 30/70 %.

Co se týče výkonu mezi výstupy 2 a 3 ukázalo se, že projde pouze malá část světla o vlnové délce cca 590 a 620 nm, viz graf č. 15. Nejmenší vypočítané vložné ztráty byly 21,6 dB při vlnové délce 622 nm. Ostatní hodnoty byly větší než 25 dB jak je vidět z grafu č. 16. Tyto hodnoty musí být co největší pro všechny mnou používané děliče.

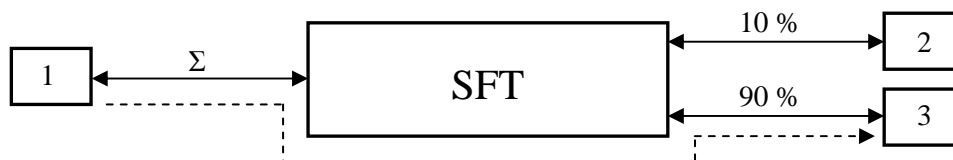
Homogenitu ztrát v tomto případě nepočítám, protože se jedná o dělič, který má mít v každé větvi jiný výkon a homogenita by pro nás neměla žádnou vypovídací hodnotu.

Celkové ztráty tohoto děliče jsou znázorněny v grafu č. 17. Největší naměřená hodnota byla 7,94 dB pro vlnovou délku 411 nm a nejmenší naměřená hodnota 1,046 dB pro vlnovou délku 957 nm.

Z grafů naměřených a vypočítaných charakteristik je opět vidět, jak je tento dělič silně závislý na vlnové délce světla. Pokud bychom jej chtěli stejně jako v předchozím případě použít například pro vlnovou délku 850,2 nm, musíme počítat s tím, že dělicí poměr nebude 30/70% nýbrž 91,383/8,617% apod. To stejné platí také pro ostatní výše uvedené parametry.

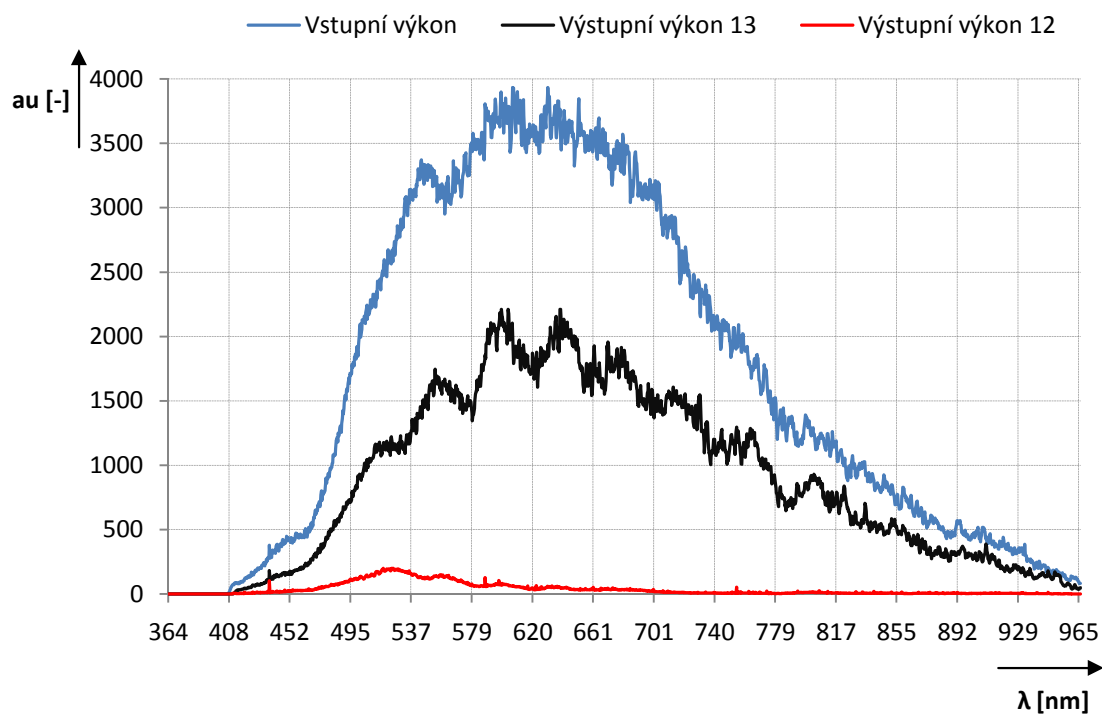
5.3. Dělič SFT-S035-1x02-10-CM1-SPC-SPC

Třetí měřený dělič by měl mít v jedné větvi 10 % z celkového vstupního výkonu a ve druhé 90 %. Tak jak je uvedeno na obrázku č. 28.

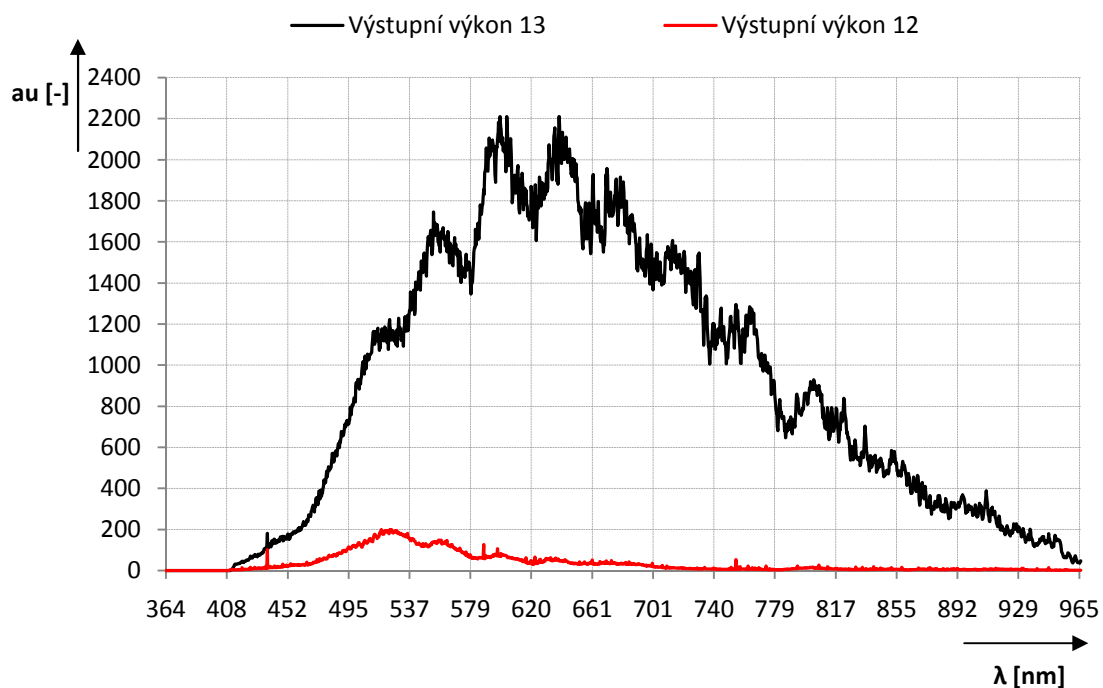


Obrázek 28: Blokové schéma rozdělení výkonů SFT-1x2 děliče

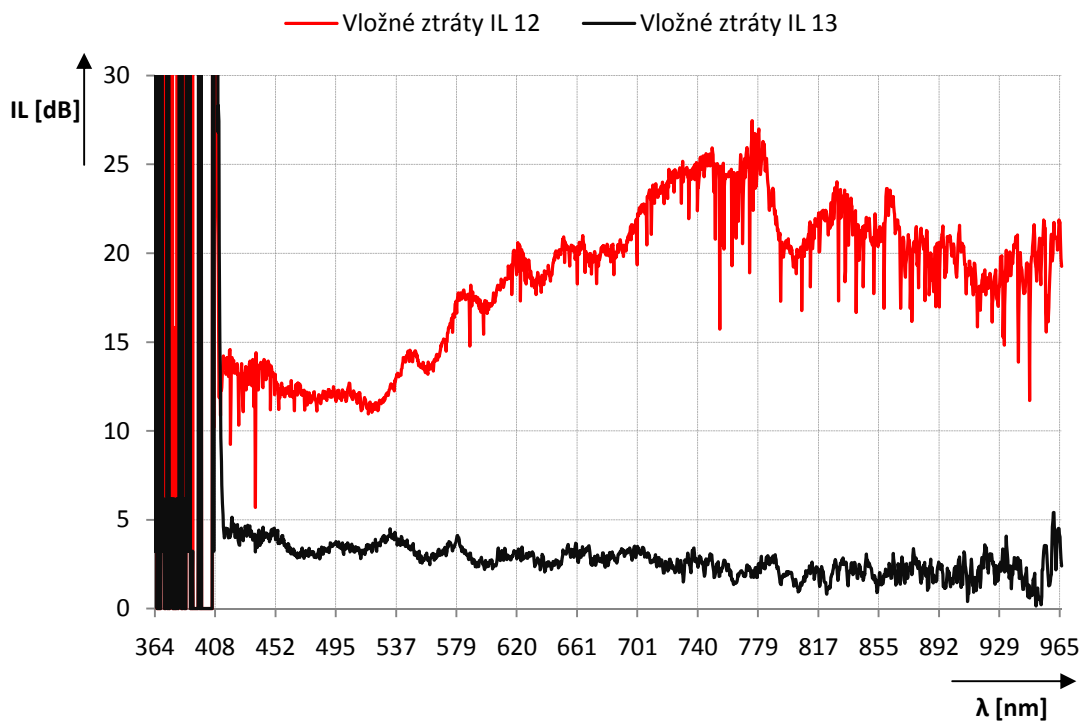
Graf č. 18: Porovnání vstupního výkonu s výstupními výkony ve větvích 2 a 3



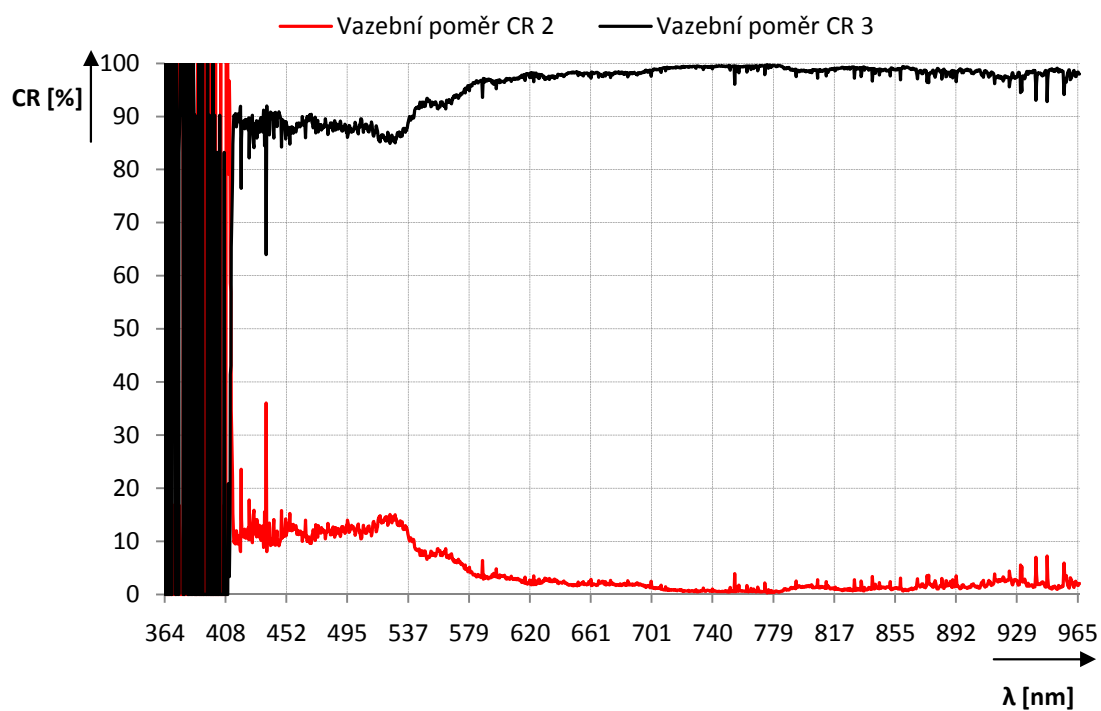
Graf č. 19: Rozdělení vstupní výkon ve výstupních větvích 2 a 3



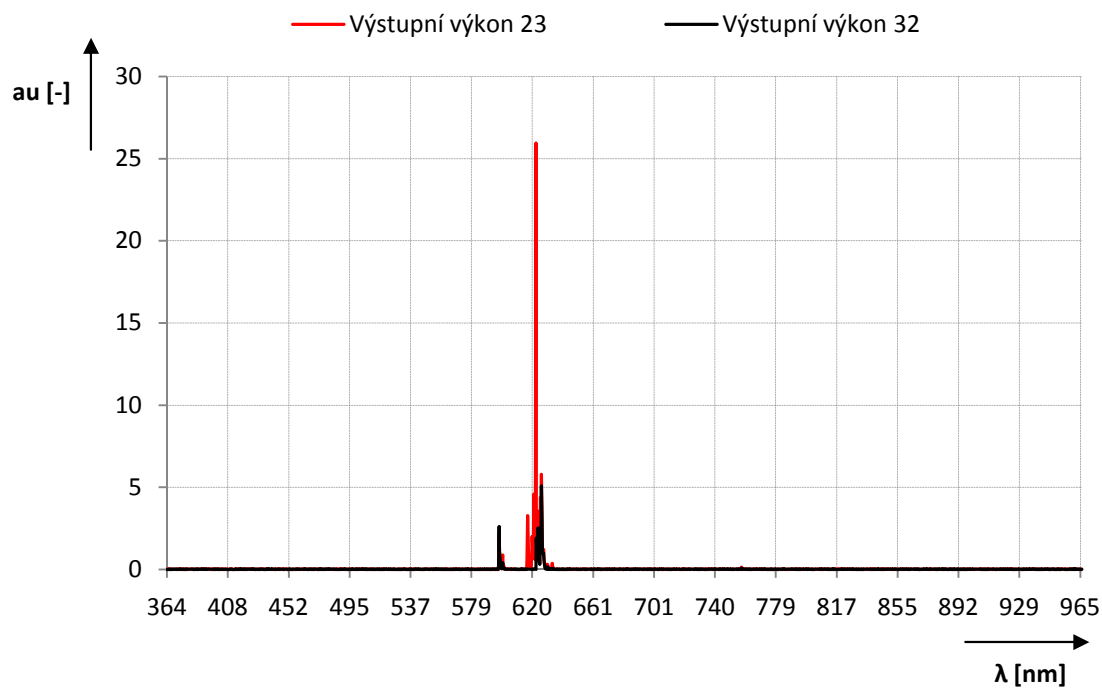
Graf č. 20: Vložné ztráty mezi větvemi 12 a 13



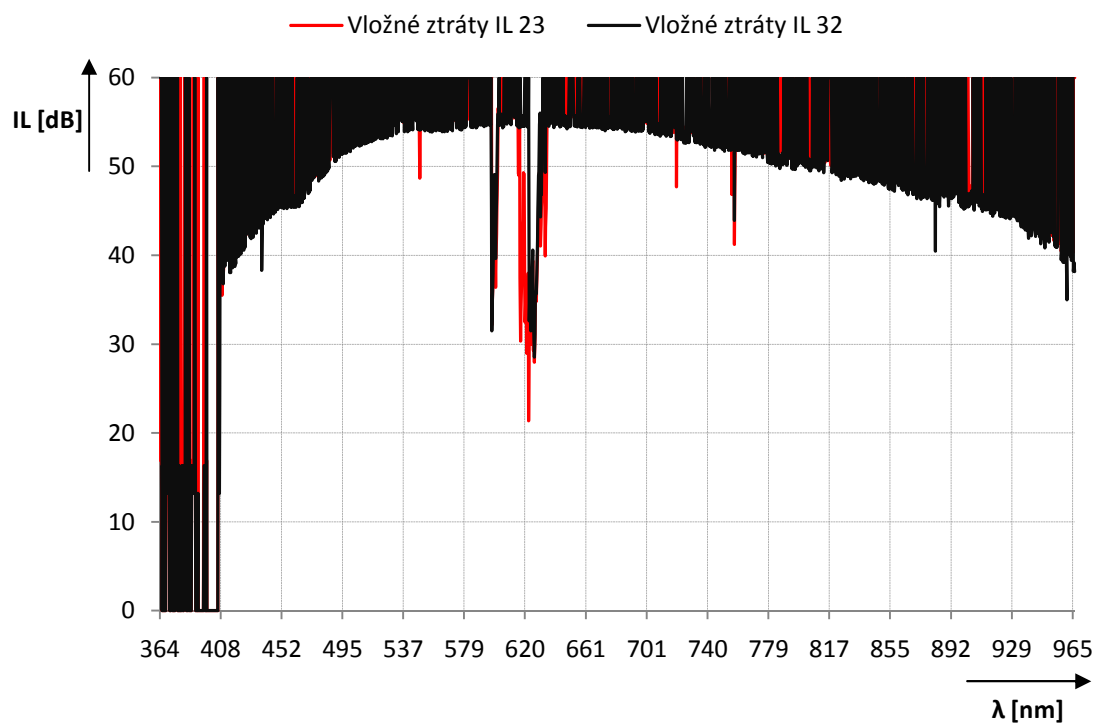
Graf č. 21: Vazební poměr ve dvou větvích 2 a 3



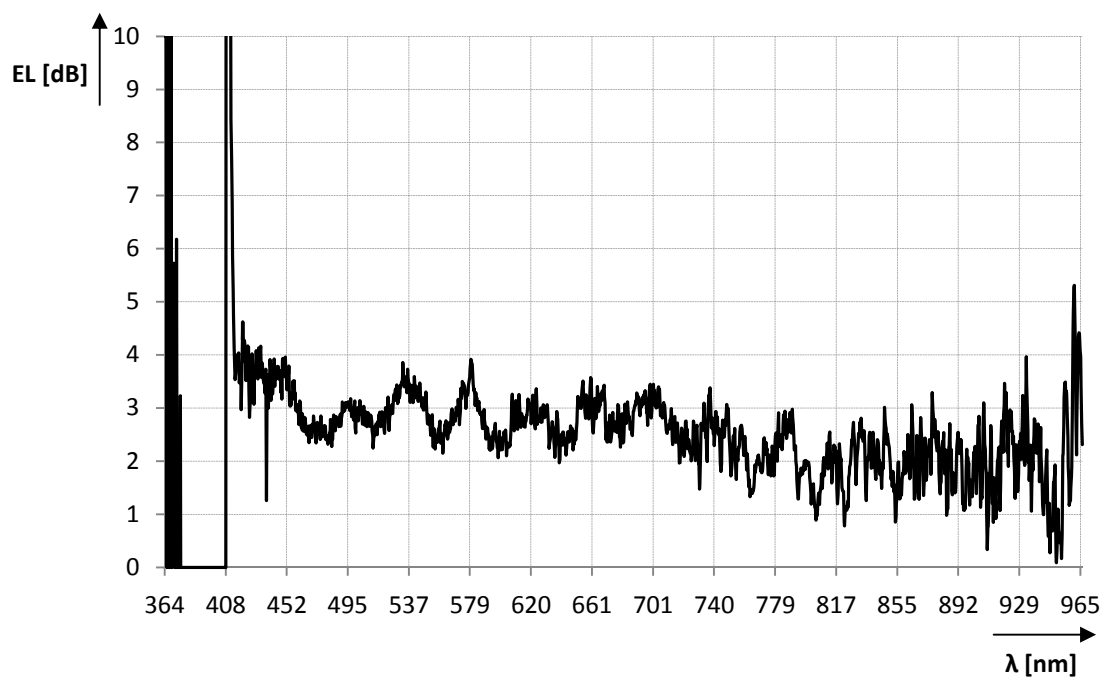
Graf č. 22: Naměřený výkon mezi větvemi 23 a 32



Graf č. 23: Vložné ztráty mezi větvemi 23 a32



Graf č. 24: Celkové ztráty



5.3.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x02-10-CM1-SPC-SPC

Při pohledu na graf č. 18 vidíme, že je v tomto případě vyšší výkon na výstupu 3, než tomu bylo u předchozích děličů. Je to způsobeno tím, že je tento dělič konstruován tak, aby rozděloval výkony v poměru 90/10 %. Ve výstupu 2 má být pouze 10 % vstupního výkonu, ale opět pozorujeme nižší hodnoty. V grafu č. 19 lze vidět, jaký je rozdíl mezi výkonem na výstupu 2 a na výstupu 3.

Vložné ztráty jsou znázorněny v grafu č. 20. Nejvyšší hodnoty vložných ztrát pro výstup 2 bylo dosaženo při vlnových délkách 775 nm a to 26,59 dB. Pro ostatní vlnové délky se vložné ztráty pohybovaly mezi 15 - 20 dB. Co se týče výstupu 3, hodnota vložného útlumu se pohybovala většinou pod 5 dB opět v závislosti na vlnové délce a nejmenší hodnota byla 0,22 dB při vlnové délce 953,5 nm.

Dělicí (vazební) poměr CR jsem pro přehlednost opět uvedl v procentech v grafu č. 21 a je z něj patrné jak se mění vazební poměr v závislosti na vlnové délce. Můžeme si všimnout, že se tento dělič chová, jak má pro vlnové délky cca 410 – 500 nm, kdy je vazební poměr cca 90/10 %. Při vyšších vlnových délkách se skoro celý výkon přesune do výstupu 3 a ve výstupu 2 zůstává jen minimální výkon.

Mezi výstupy 2 a 3 se ukázalo, že projde opět pouze jen malá část světla o vlnové délce cca 620 nm, viz graf č. 22. Nejmenší vypočítané vložné ztráty byly 21,35 dB při vlnové délce 622 nm ze směru 23. Ostatní hodnoty byly větší než 25 dB jak je vidět z grafu č. 23.

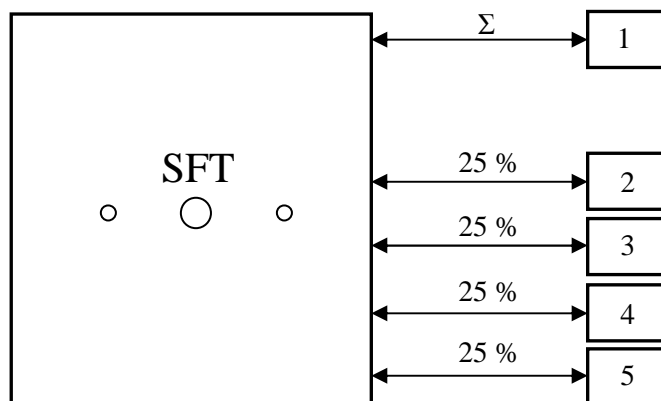
Homogenitu ztrát v tomto případě nepočítám, protože se jedná o dělič, který má mít v každé větvi jiný výkon a homogenita by pro nás neměla žádnou vypovídací hodnotu.

Celkové ztráty tohoto děliče jsou znázorněny v grafu č. 24. Největší naměřená hodnota byla 5,26 dB pro vlnovou délku 961 nm a nejmenší naměřená hodnota 0,08 dB pro vlnovou délku 950,5 nm.

Z grafů naměřených a vypočítaných charakteristik je vidět silnou závislost na vlnové délce světla. Pokud bychom jej chtěli stejně jako v předchozím případě použít například pro vlnovou délku 850,2 nm, musíme počítat s tím, že dělicí poměr nebude 90/10% nýbrž 98,597/1,403% apod. To stejné platí také pro ostatní výše uvedené parametry. Pokud bychom požadovali výrobcem garantovaný dělicí poměr 90/10 % můžeme jej dosáhnout při vlnových délkách cca 410-500 nm.

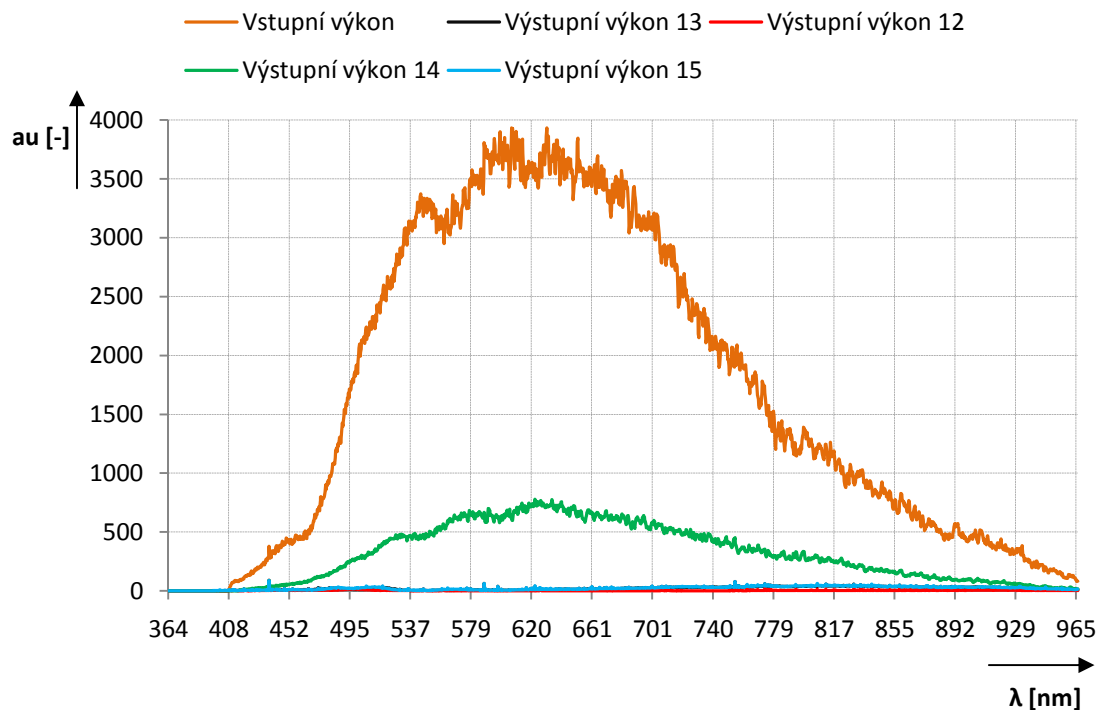
5.4. Dělič SFT-S035-1x04-25-CM3-SPC-SPC

Poslední dělič, který jsem měřil, by měl rozdělovat vstupní výkon rovnoměrně do čtyř větví. V každé větvi by tedy mělo být 25 % celkového vstupního výkonu, viz obrázek č. 25.

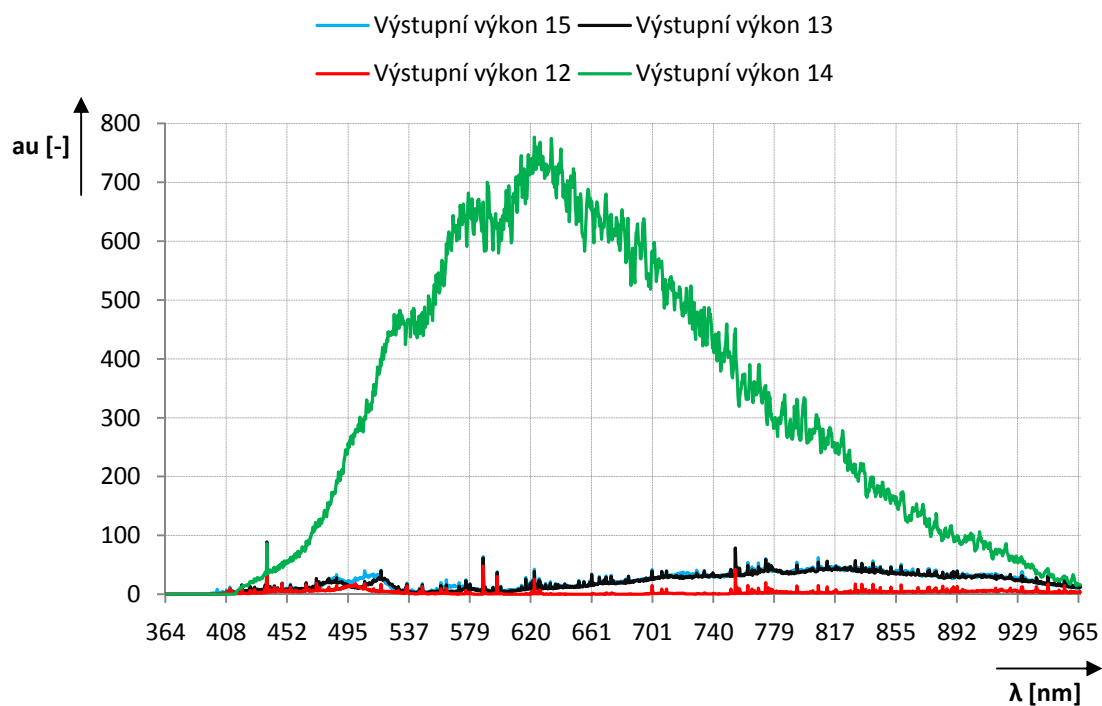


Obrázek 25: Blokové schéma měřeného děliče 1x4 [příloha 2]

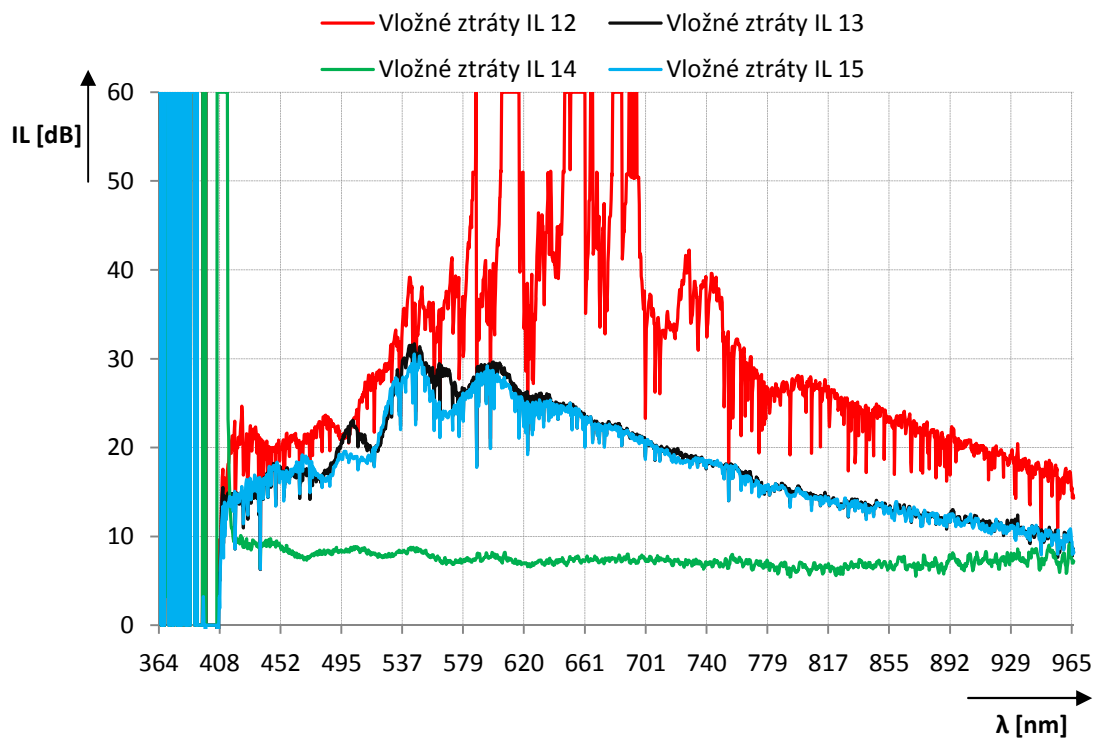
Graf č. 25: Porovnání vstupního výkonu s výstupními výkony ve větvích 2, 3, 4 a 5



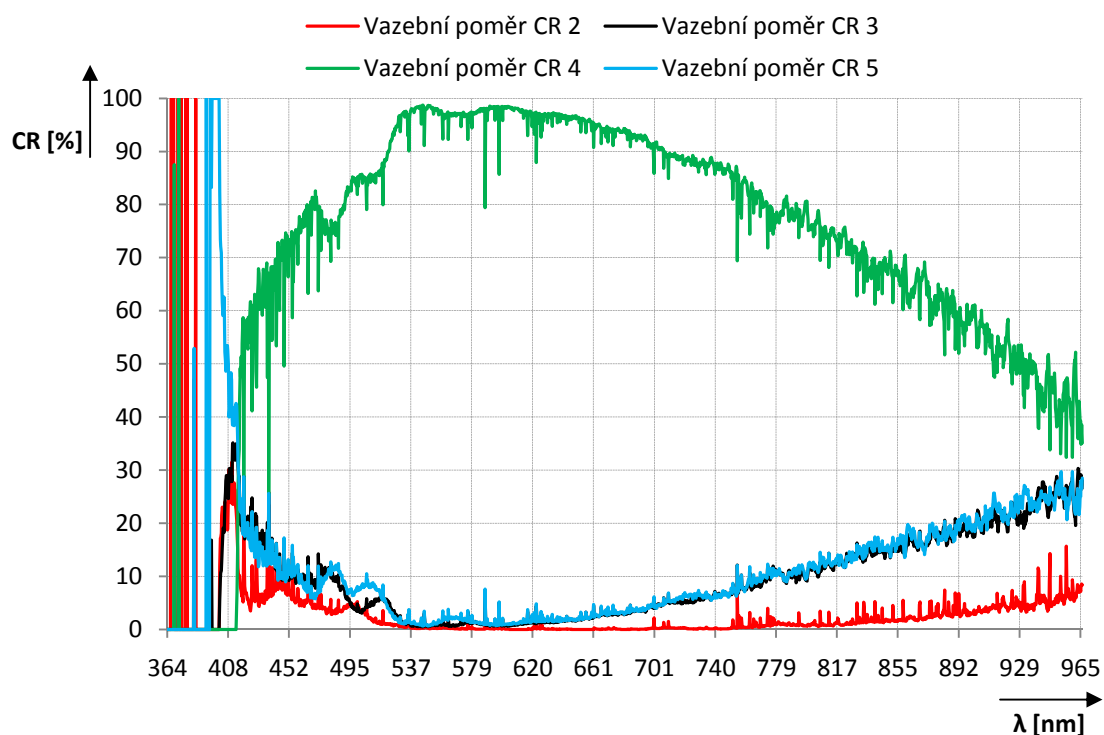
Graf č. 26: Rozdělení vstupního výkonu do čtyř výstupních větví 2, 3, 4, 5



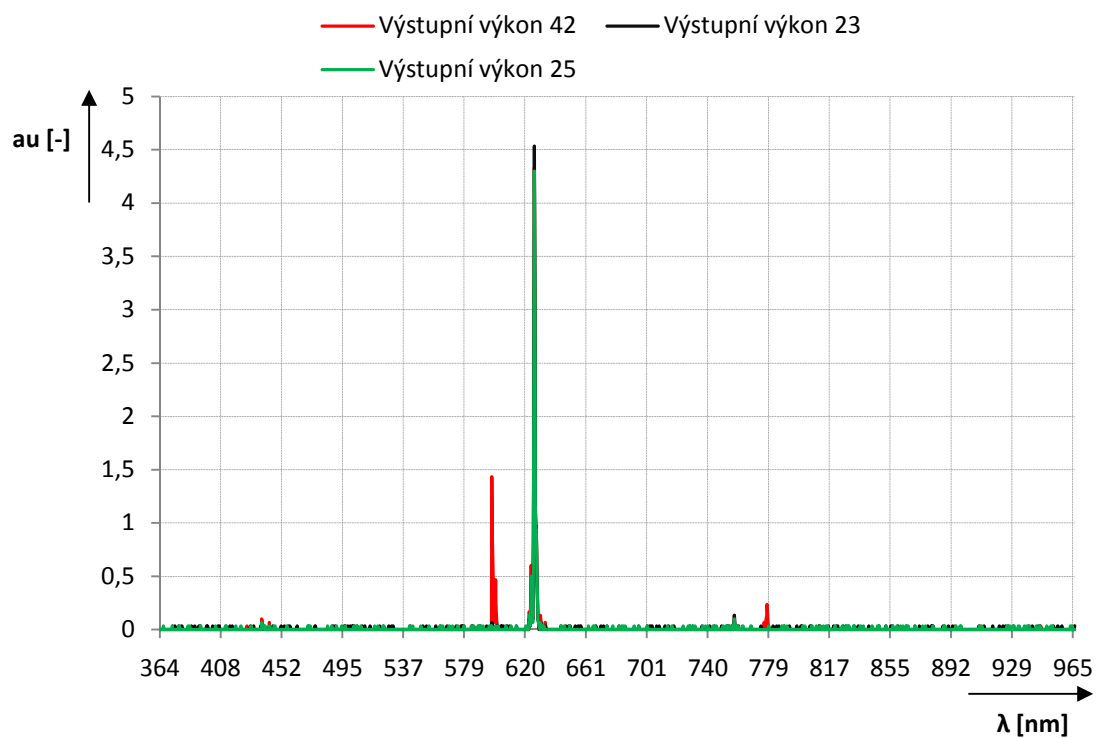
Graf č. 27: Vložné ztráty mezi větvemi 12, 13, 14, 15



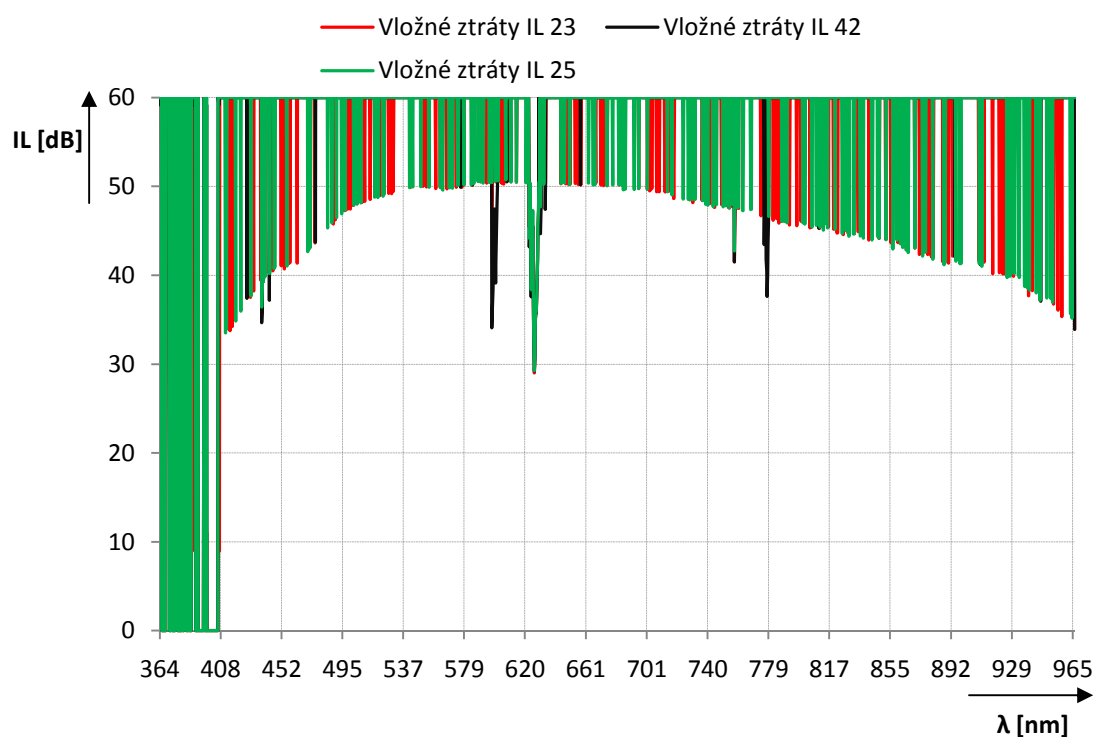
Graf č. 28: Vazební poměry ve čtyřech větvích 2, 3, 4 a 5



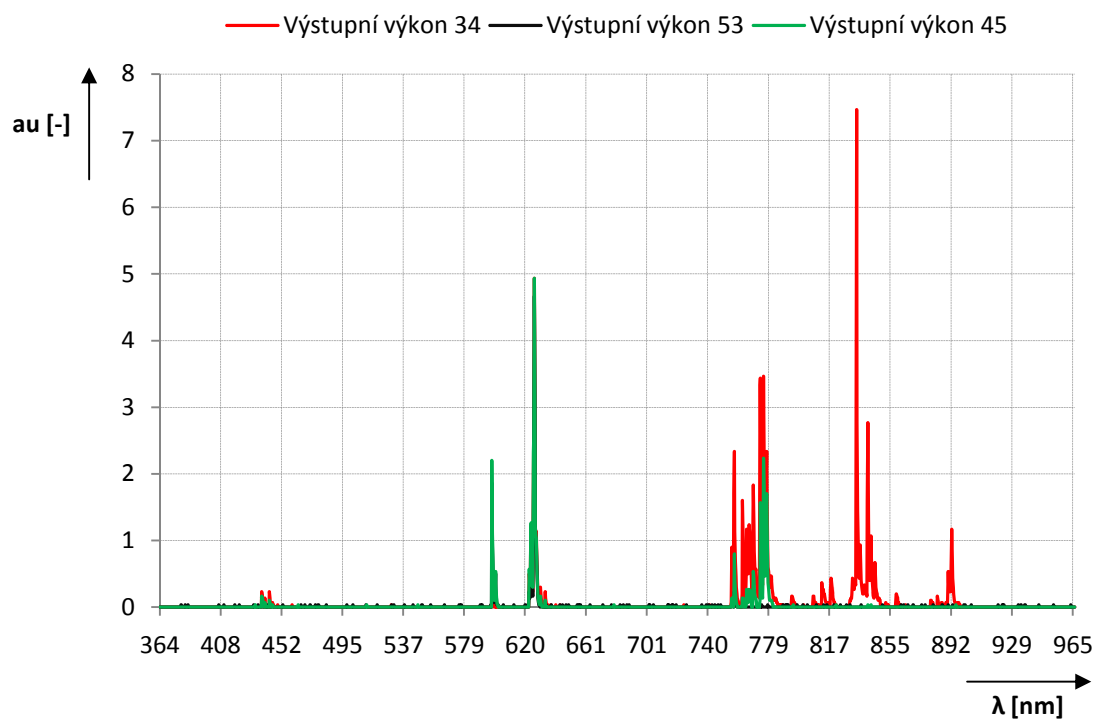
Graf č. 29: Naměřený výstupní výkon mezi větvemi 25, 42, 23



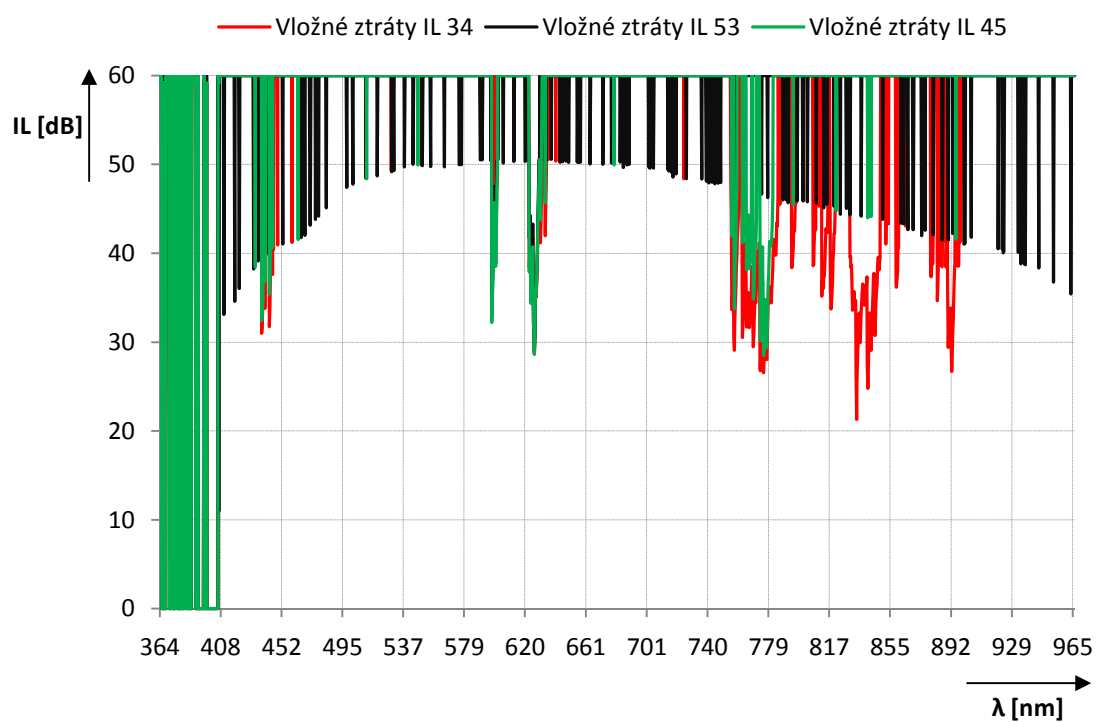
Graf č. 30: Vložné ztráty mezi větvemi 23, 42, 25



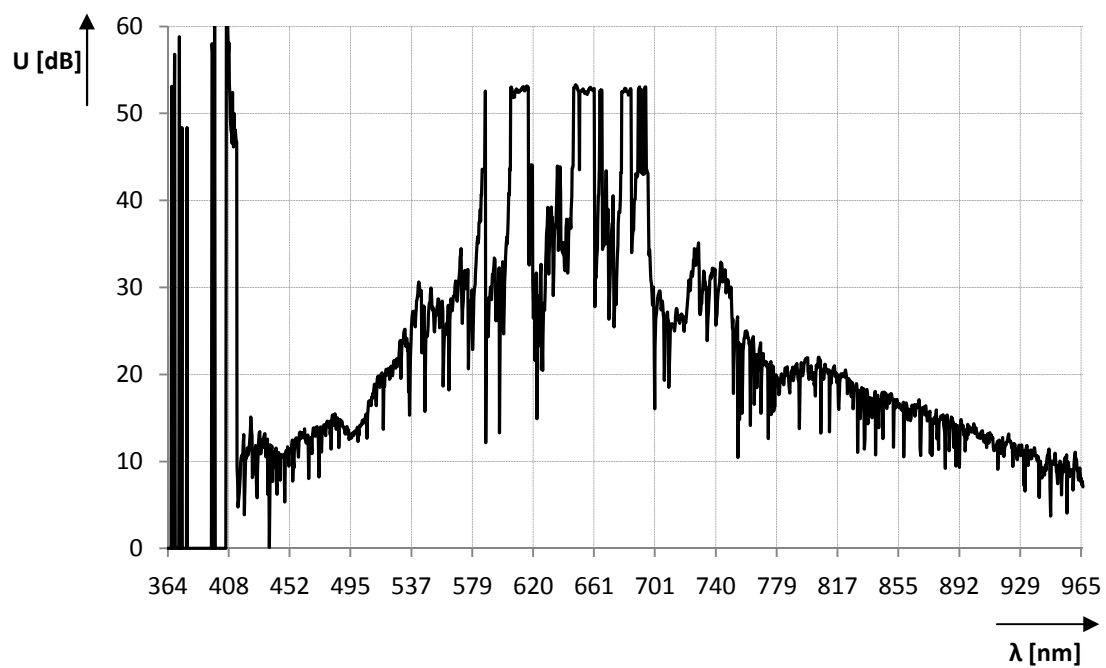
Graf č. 31: Naměřený výstupní výkon mezi větvemi 34, 53, 45



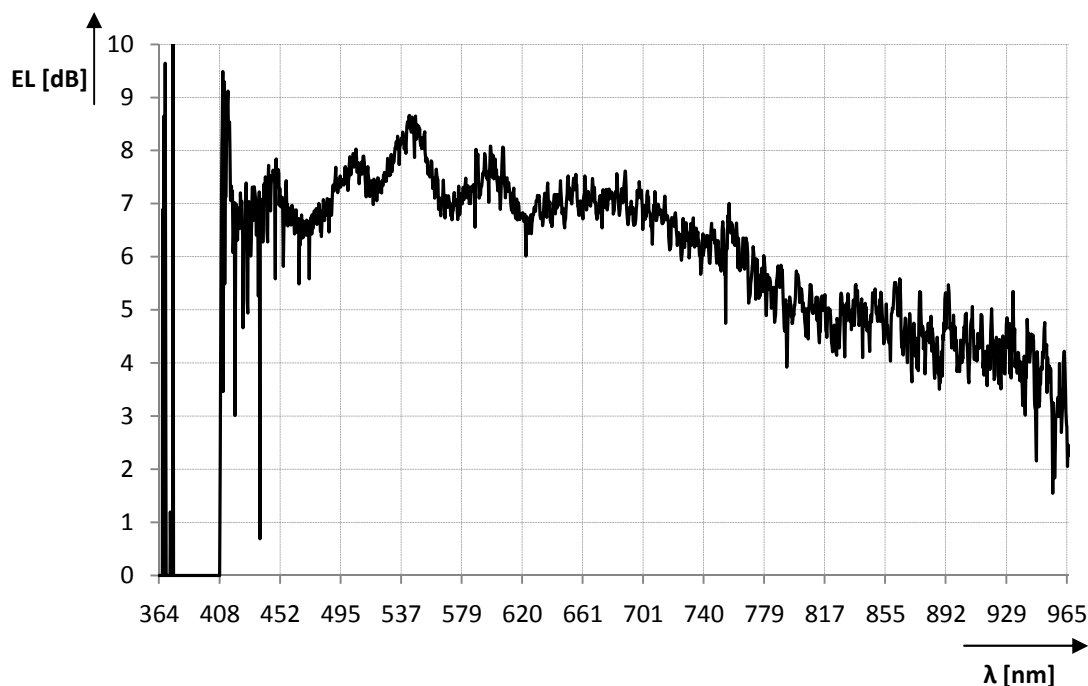
Graf č. 32: Vložné ztráty mezi větvemi 34, 53, 45



Graf č. 33: Homogenita ztrát pro větve 2, 3, 4 a 5 (ideálně nulová)



Graf č. 34: Celkové ztráty



Jak jsem uvedl výše, tento dělič je stejně jako ostatní měřené děliče obousměrný prvek resp. jsou pouze nepatrné rozdíly v tom, jestli jej měříme z jedné nebo druhé strany. Výše uvedené grafy 26 a 27 pro větve 23, 42, 25, 34, 53, 45 jsem tedy náhodně zvolil proto, abych znázornil průběhy pro všechny možné kombinace měření. Tyto charakteristiky jsou tedy platné i pro kombinace z opačného směru 32, 24, 52, 43, 35, 54.

5.4.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x04-25-CM3-SPC-SPC

Pokud se podíváme na porovnání vstupního a výstupních výkonů v grafu č. 25, všimneme si, že je v tomto případě nejvyšší výkon na výstupu 4. V dalších výstupních větvích 2, 3, 5 je pouze minimální množství navázaného světla. Ve všech výstupech by však mělo být 25 % vstupního výkonu, ale opět pozorujeme nižší hodnoty. V grafu č. 26 lze vidět, jaký je rozdíl mezi výkony na výstupech 2, 3, 4 a 5. Ve výstupech 5 a 3 je navázáno relativně stejné malé množství světla, zatímco ve výstupu 2 je skoro nulová vazba.

Vložné ztráty jsou znázorněny v grafu č. 27. Nejvyšší hodnoty vložných ztrát, jak už napovídají předchozí charakteristiky výstupních výkonů, jsou pro výstup 2. Při vlnových délkách mezi cca 580 nm až 700 nm se setkáme s tím, že je útlum vyšší než 60 dB. Což znamená opravdu velice nízké hodnoty výstupního výkonu hranici dynamického rozsahu spektrometru. Dalo by se tedy říct, že jsem při těchto vlnových délkách naměřil na výstupu nulové hodnoty, při vyšších vlnových délkách se však vložné ztráty zmenšovaly k cca 15 dB. Výstup 3 a 5 měl maximální hodnotu vložných ztrát při vlnové délce cca 540 – 600 nm a to 30 dB. S dalším zvyšováním vlnové délky vložné ztráty také klesaly až k hodnotám 10 dB. Co se týče výstupu 4, hodnota vložných ztrát se pohybovala většinou pod 10 dB opět v závislosti na vlnové délce.

Dělicí (vazební) poměr CR jsem pro přehlednost opět uvedl v procentech v grafu č. 28 a je z něj patrné jak se mění vazební poměr v závislosti na vlnové délce. Je z něj patrné jak se pro vyšší vlnové délky začíná dělič chovat jak má. Neboli mít v každé větvi 25 % (hlavně výstupy 3 a 5). Ve výstupu 2 se už také začíná objevovat vazba, i když pouze cca 10 %.

Mezi výstupy 25, 42, 23 projde opět pouze jen malá část světla o vlnové délce 598 (výstupy 42) a 626 nm (výstupy 23 a 23), viz graf č. 29. Nejmenší vypočítané vložné ztráty byly 29,25 dB při vlnové délce 626 nm mezi výstupy 25. Ostatní hodnoty byly větší než 30 dB jak je vidět z grafu č. 30. Podobné výsledky vykazovaly i výstupy 34, 53, 45, ale navíc projde malá část světla při vlnové délce cca 760 – 855 nm, viz graf č. 31. Nejmenší vypočítané vložné ztráty byly 21,31 dB (834 nm) mezi výstupy 34. Ostatní hodnoty byly okolo 30 dB nebo větší, jak je vidět z grafu č. 32.

Homogenita ztrát znázorněná v grafu č. 33 by měla být co nejmenší a jelikož vyplývá z vložných ztrát, je také závislá na vlnové délce. Můžeme si všimnout, že je nejhorší (největší) opět pro vlnové délky okolo 580 - 700 nm stejně jako vložné ztráty.

Celkové ztráty tohoto děliče jsou znázorněny v grafu č. 34. Opět zde vidíme, že čím používáme vyšší vlnovou délku, tím jsou celkové ztráty nižší.

Z výše uvedených naměřených a vypočítaných charakteristik můžeme opět vidět, jak je tento dělič silně závislý na vlnové délce světla. Pokud bychom jej chtěli stejně jako v předchozím případě použít například pro vlnovou délku 850,2 nm, musíme počítat s tím, že dělicí poměr nebude 4 x 25 %, ale 1,67 % (pro výstup 2), 13,47 % (výstup 3), 71,21 % (výstup 4), 13,65 % (výstup 5) apod. Musíme tedy vždy zvážit, pro jaké vlnové délky nám tento dělič vyhovuje a pro jaké už nikoliv.

6. Spektrální charakteristiky 2. část

Tato kapitola je věnována zpracováním naměřených hodnot pomocí měřiče vlnových délek EXFO 7600 - WA, pro stejné čtyři typy vláknově optických děličů jako v předchozí kapitole. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou taktéž uvedeny ve stejném chronologickém sledu.

Měřil jsem hodnotu výkonů jednotlivých vlnových délek v uvedeném rozsahu, viz kapitola 4.2. Při zpracování výsledků se ukázalo, že používaný zdroj LS-1-CAL není natolik stabilní, aby bylo možné takto změřit jednotlivé spektrální charakteristiky.

Docházelo k tomu, že sice v součtu úrovní jednotlivých vlnových délek byl celkový výstupní výkon odpovídající předpokládaným parametrům (naměřený „total power“), ale co se týče přesného spektrálního měření, nebylo možné automatickým ani ručním odečítáním stanovit potřebné poměrové hodnoty. Signál kolísal a naměřené výstupní hodnoty pro jednotlivé vlnové délky tedy nedisponovali potřebnou vypovídající hodnotou. Naměřené výsledky a příklady naměřených hodnot pro všechny děliče uvádím v následujících podkapitolách. Všechny ostatní doplňující zdrojové naměřené i vypočítané hodnoty jsem vložil do příloh na přiložené CD.

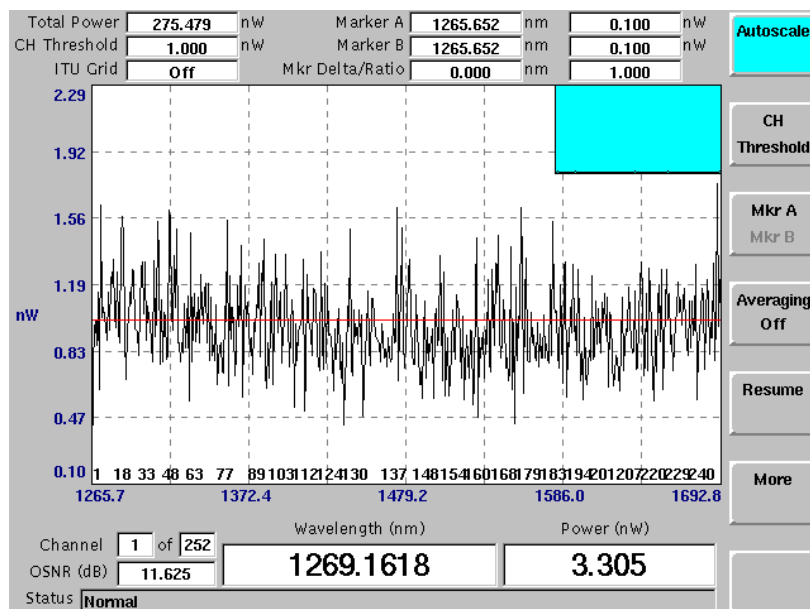
Tato metoda je vhodná pouze pro měření celkových hodnot. Pokud jde však o takto přesné spektrální měření, musel by se použít kvalitní stabilní zdroj a spektrometr (spektrální analyzátor) s potřebným rozsahem nebo spektrálně selektivní prvek (monochromátor).

Vzor výpočtu v této části již neuvádím, protože se jedná o stejné výpočty jako v minulé kapitole, viz kapitola 5.1.1. Pouze s tím rozdílem, že zde provádím výpočty pro celkové hodnoty naměřeného výkonu a ne pro každou vlnovou délku zvlášť.

Všechny naměřené a vypočítané hodnoty jsem uvedl do tabulek č. 1 – 5. Zhodnocení každého děliče jsem uvedl vždy na konec příslušné podkapitoly.

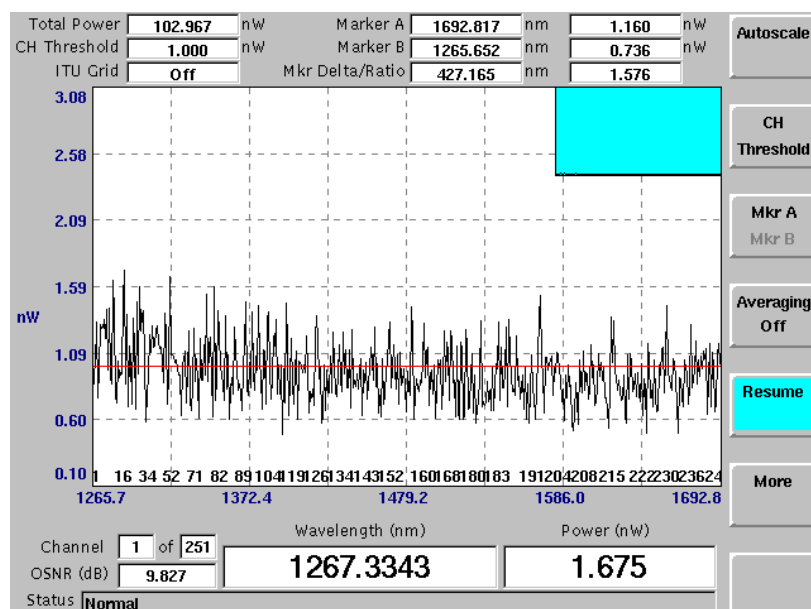
6.1. Dělič SFT-S035-1x02-50-CM1-SPC-SPC

Výkon zdroje LS1-CAL (vstupní výkon) je zobrazen na následujícím obrázku č. 29



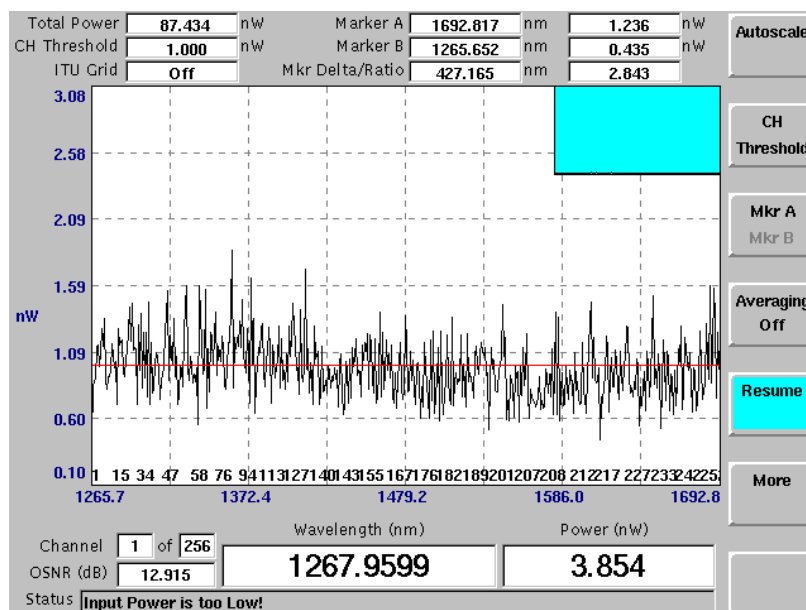
Obrázek 29: Vstupní výkon LS1-CAL

Po připojení prvního děliče jsem změřil výkon mezi větvemi 12, viz obrázek č. 30



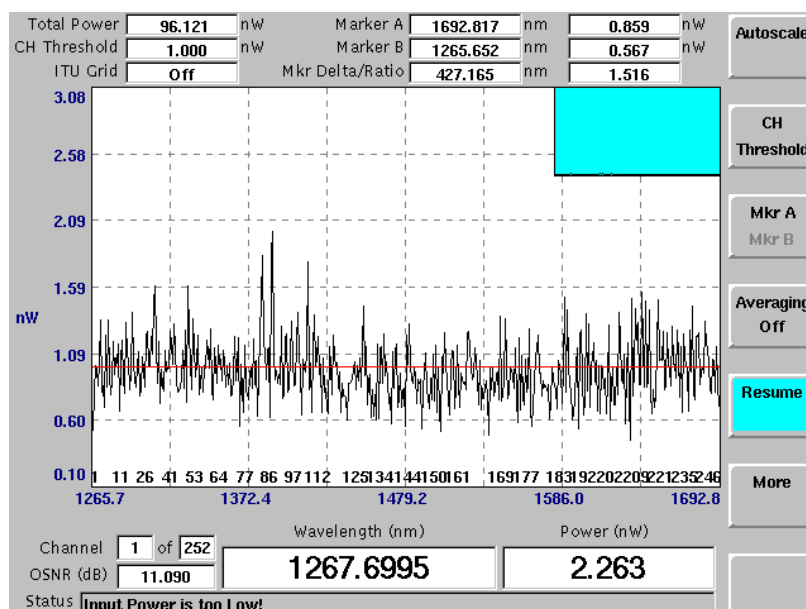
Obrázek 30: Výkon mezi větvemi 12 prvního děliče (50/50)

Výkon mezi větvemi 13 je zobrazen na následujícím obrázku:



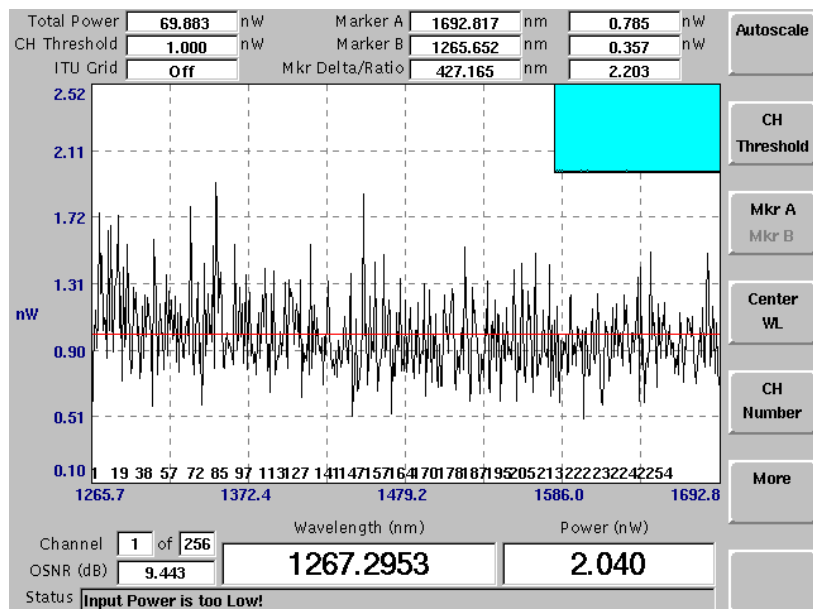
Obrázek 31: Výkon mezi větvemi 13 prvního děliče (50/50)

Výstupní výkon měřený z opačného směru pro větev 21:



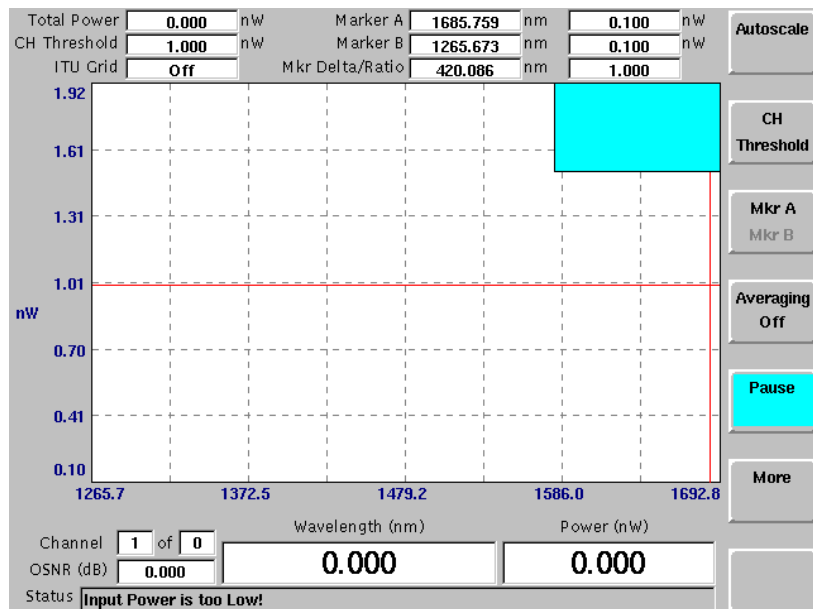
Obrázek 32: Výkon mezi větvemi 21 prvního děliče (50/50)

Výstupní výkon měřený z opačného směru pro větev 31:



Obrázek 33: Výkon mezi větvemi 31 prvního děliče (50/50)

Výstupní výkon pro větve 23 a 32 nebylo možné ani detekovat, protože je mezi nimi velký útlum:



Obrázek 34: Výkon mezi větvemi 23 a 32 prvního děliče (50/50)

Naměřené a vypočítané hodnoty (vstupní výkon $P_{IN} = 275,479\text{nW}$):

Mezi větve	Naměřený výkon [nW]	CR [%]	IL [dB]	EL [dB]	U [dB]
12	102,967	54,079	4,273	1,604	0,711
13	87,434	45,921	4,984	1,604	0,711
21	96,121	57,902	4,572	2,199	1,385
31	69,883	42,098	5,957	2,199	1,385
23	0	-	-	-	-
32	0	-	-	-	-

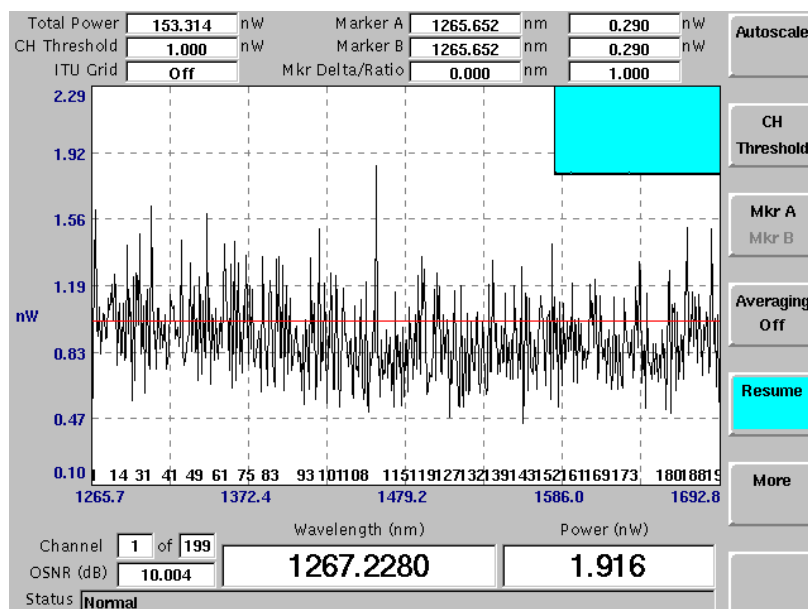
Tabulka č. 1: Naměřené a vypočítané hodnoty pro první dělič (50/50)

6.1.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x02-50-CM1-SPC-SPC

Výrobce pro tento dělič udává vazební poměr větší než 40 %. Jak je vidět v tabulce č. 1 vazební poměr je vždy vyšší než 40% což odpovídá. Vložné ztráty by měli být 3,6 dB a v mém případě vyšly nejméně 4,273 dB. Celkové ztráty by měli být 0,2 dB, avšak v našem případě vyšly cca 10krát vyšší. Homogenita ztrát by dle výrobce měla být $\leq 0,8$ dB, to platí pro směr 12 a 13. Ve směru 21 a 31 byla homogenita už vyšší a to cca o 0,6 dB než v opačném směru. Část hodnot tedy vyšla jinak, než jak udává výrobce. Výrobce tyto hodnoty zaručuje při použití vlnových délek 1310 ± 40 nm a 1550 ± 80 nm. V měření bylo použito halogenového zdroje, který vyzařuje široké spektrum vlnových délek. Výsledné hodnoty v tabulce jsou počítány z celkových naměřených hodnot na rozsahu 1265 - 1692 nm. V předchozí 1. části měření jsme mohli vidět, jak moc ovlivňuje použitá vlnová délka vlastnosti tohoto děliče. Použije-li se tedy pro jiné než udávané vlnové délky, dochází k nedokonalému navázání světla do vláken a ke zvýšení vložných a celkových ztrát.

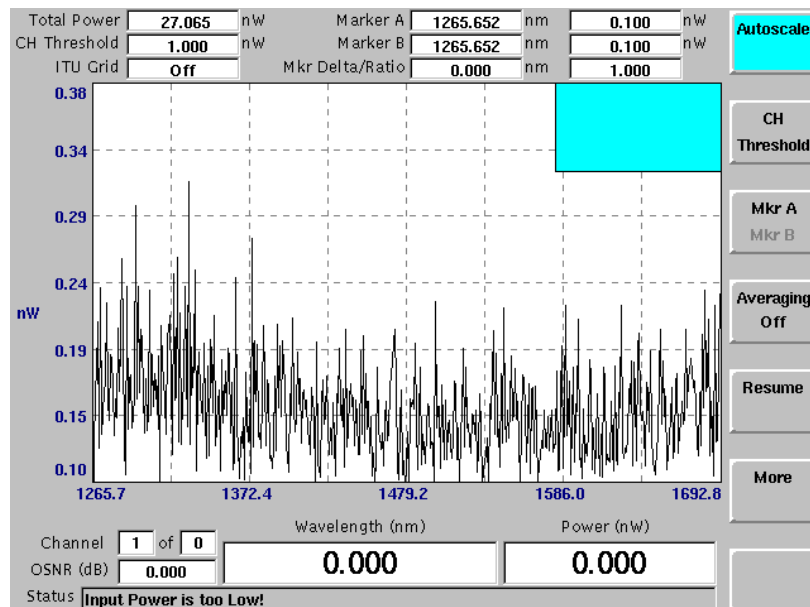
6.2. Dělič SFT-S035-1x02-30-CM1-SPC-SPC

Výkon zdroje LS1-CAL (vstupní výkon) zůstal stejný jako při měření prvního děliče, viz obrázek č. 29. Výkon mezi větvemi 12 je zobrazen na následujícím obrázku č. 35.



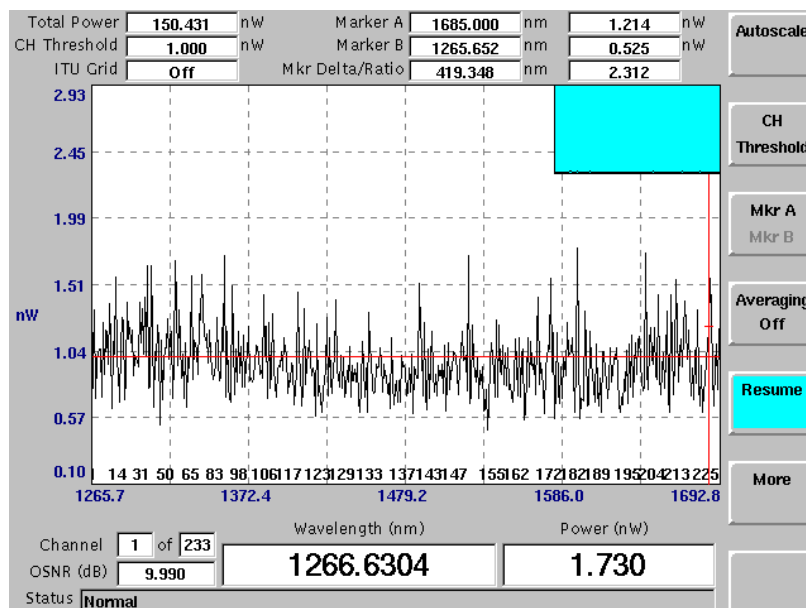
Obrázek 35: Výkon mezi větvemi 12 druhého děliče (30/70)

Výkon mezi větvemi 13:



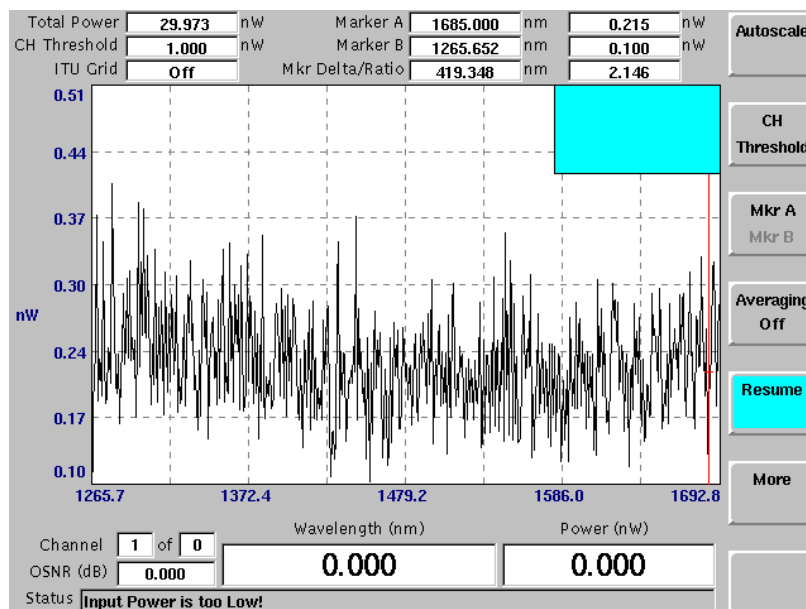
Obrázek 36: Výkon mezi větvemi 13 druhého děliče (30/70)

Výkon mezi větvemi 21, neboli měření z opačného směru než je 12:



Obrázek 37: Výkon mezi větvemi 21 druhého děliče (30/70)

Výstupní výkon měřený z opačného směru pro větev 31:



Obrázek 38: Výkon mezi větvemi 31 druhého děliče (30/70)

Výstupní výkon pro větve 23 a 32 nebylo stejně jako u předchozího děliče možné detekovat, protože je mezi nimi velmi vysoký útlum. (ilustrace obrázek č. 34)

Naměřené a vypočítané hodnoty (vstupní výkon $P_{IN} = 275,479\text{nW}$):

Mezi větve	Naměřený výkon [nW]	CR [%]	IL [dB]	EL [dB]
12	153,314	84,995	2,545	1,839
13	27,065	15,005	10,07	1,839
21	150,431	83,385	2,627	1,838
31	29,973	16,615	9,633	1,838
23	0	-	-	-
32	0	-	-	-

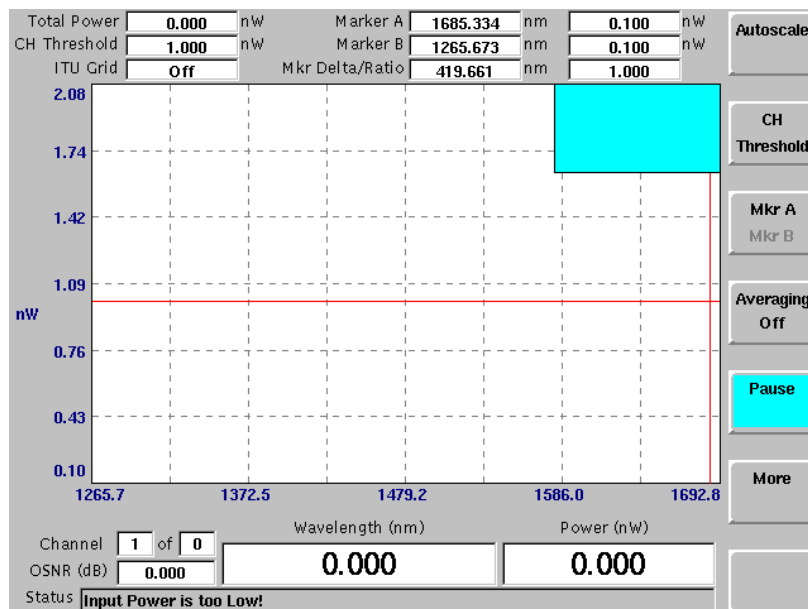
Tabulka č. 2: Naměřené a vypočítané hodnoty pro druhý dělič (30/70)

6.2.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x02-30-CM1-SPC-SPC

Jak je vidět v tabulce č. 2, vazební poměr příliš neodpovídá předpokládaným hodnotám. V obou směrech měření vyšel vazební poměr místo 30/70 % spíše 85/15 %. Vložné ztráty by měli být 6,2 dB (tap port) a 1,9 dB (throughput port), v mém případě vyšly cca 10 dB a 2,5 dB. Celkové ztráty by měli být 0,2 dB, avšak v mém případě vyšly cca 9krát vyšší. Homogenita ztrát u toho typu děliče nemá žádnou vypovídající hodnotu, proto ji zde neuvádím. Část hodnot vyšla jinak, než jak udává výrobce. Výrobce tyto hodnoty zaručuje při použití vlnových délek $1310 \pm 40\text{ nm}$ a $1550 \pm 80\text{ nm}$. V měření bylo použito halogenového zdroje, který vyzařuje široké spektrum vlnových délek. Výsledné hodnoty v tabulce jsou počítány z celkových naměřených hodnot na rozsahu 1265 - 1692 nm. V předchozí 1. části měření jsme mohli vidět, jak moc ovlivňuje použitá vlnová délka vlastnosti tohoto děliče. Použije-li se tedy pro jiné než udávané vlnové délky, dochází k nedokonalému navázání světla do vláken, což má v tomto případě za následek změnu dělicího poměru a zvýšení vložných a celkových ztrát.

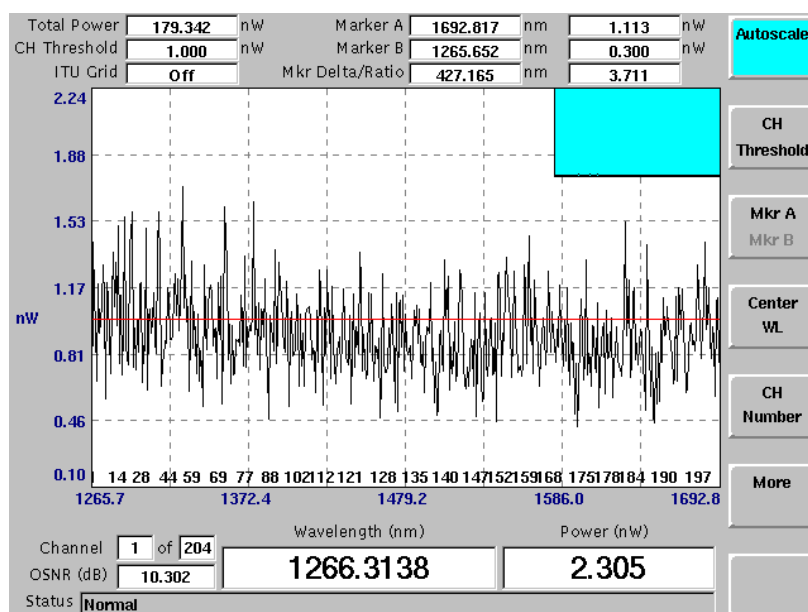
6.3. Dělič SFT-S035-1x02-10-CM1-SPC-SPC

Výkon zdroje LS1-CAL (vstupní výkon) jsem zachoval stejný jako v předchozích případech (obrázek 29). Výkon mezi větvemi 12 a 21 je příliš malý aby mohl být detekován, viz obrázek č. 39.



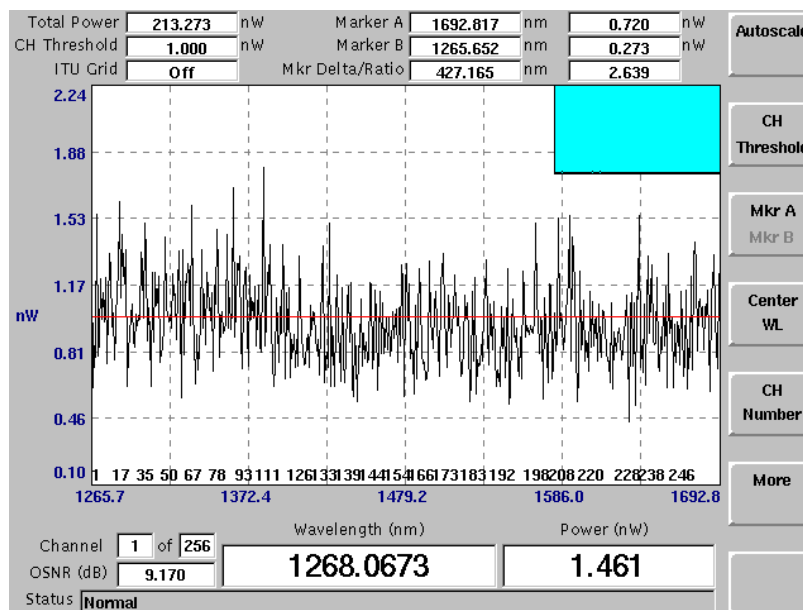
Obrázek 39: Výkon mezi větvemi 12 třetího děliče (10/90)

Výkon mezi větvemi 13:



Obrázek 40: Výkon mezi větvemi 13 třetího děliče (10/90)

Výstupní výkon měřený z opačného směru pro větev 31:



Obrázek 41: Výkon mezi větvemi 31 třetího děliče (10/90)

Výstupní výkon pro větve 23 a 32 nebylo stejně jako u předchozího děliče možné detekovat, protože je mezi nimi velmi vysoký útlum (ilustrace obrázek č. 34).

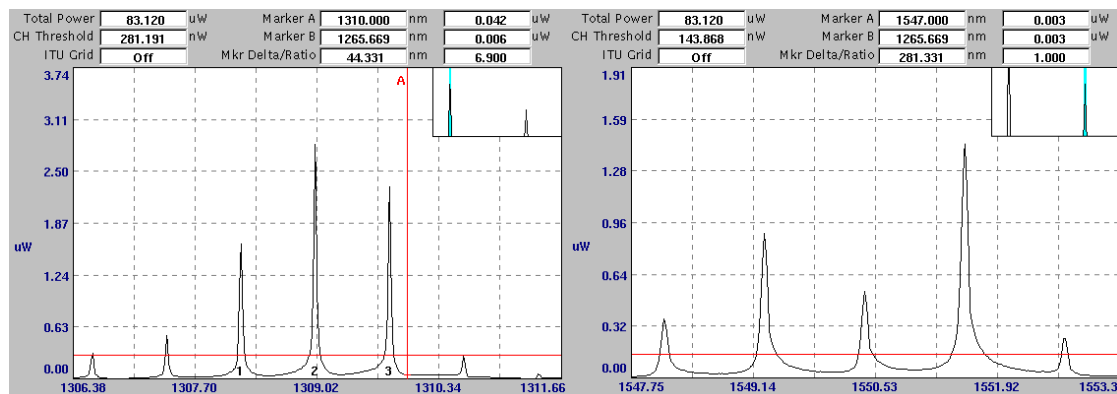
Naměřené a vypočítané hodnoty (vstupní výkon $P_{IN} = 275,479\text{nW}$):

Mezi větvemi	Naměřený výkon [nW]	CR [%]	IL [dB]	EL [dB]
12	0	-	-	-
13	179,342	100	1,86	1,86
21	0	-	-	-
31	213,273	100	1,11	1,11

Tabulka č. 3: Naměřené a vypočítané hodnoty pro třetí dělič (10/90)

Pro větve 23 a 32 byly naměřené hodnoty nulové, proto je v tabulce již neuvádím.

Pro představu zde dále uvádím příklad použití laserového zdroje OLS2 DUAL pro měření mezi větvemi 12, viz obrázek 42.



Obrázek 42: Výkon mezi větvemi 12, při použití zdroje OLS2 (dělič 10/90)

Naměřené a vypočítané hodnoty (zdroj OLS2 DUAL - vstupní výkon $P_{IN} = 910,272 \mu W$):

Mezi větvemi	Naměřený výkon [μW]	CR [%]	IL [dB]	EL [dB]
12	83,120	9,79	10,39	0,302
13	765,898	90,21	0,75	0,302

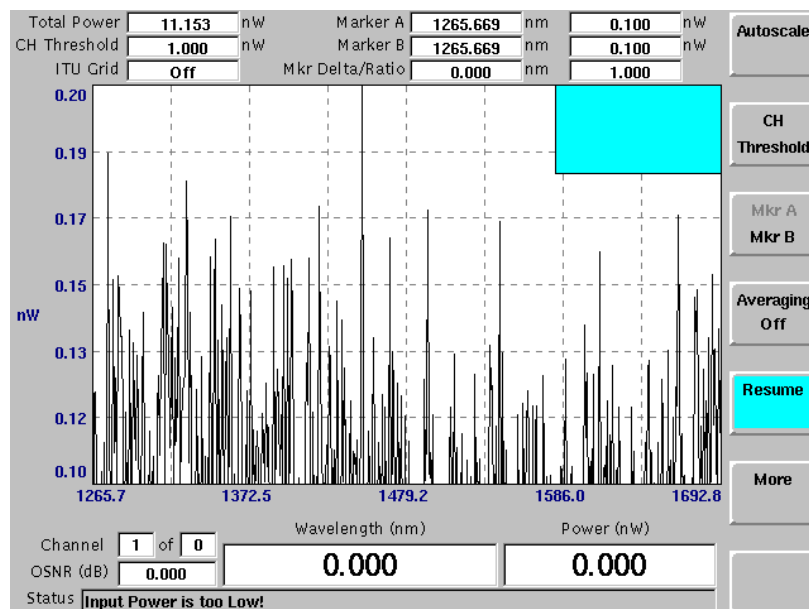
Tabulka č. 4: Naměřené a vypočítané hodnoty pro třetí dělič (10/90),

6.3.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x02-10-CM1-SPC-SPC

Výkon ve výstupu 2 byl v tomto případě natolik nízký, že jej nebylo možné měřičem vlnových délek vůbec změřit. V tabulce č. 3 jsem tedy uvedl nulovou hodnotu pro výstup 2. Výkon je tedy pouze na výstupu 3, z tohoto důvodu je vazební poměr 100%. Vložné ztráty by měli být 11,7 dB (tap port) a 0,7 dB (throughput port), v mém případě bylo možné vypočítat pouze hodnotu pro výstup 3 a to 1,86 dB a 1,11 dB. Celkové ztráty by měli být 0,2 dB. V tomto případě vyšly stejně jako vložné ztráty 1,86 dB a 1,11 dB, protože výstup 2 byl nulový. Je to způsobeno použitým zdrojem záření, který nemá dostačující výkon. Homogenita ztrát u toho typu děliče nemá žádnou vypovídající hodnotu, proto ji zde neuvádím. V tabulce č. 4 uvádím pro představu příklad, pokud použijeme jiný zdroj záření. Konkrétně laserový zdroj OLS2 DUAL. Jak je vidět vazební poměr, vložné ztráty i celkové ztráty, relativně odpovídají výrobcem udaným hodnotám. Vložné ztráty ve výstupu 2 vyšly dokonce nižší.

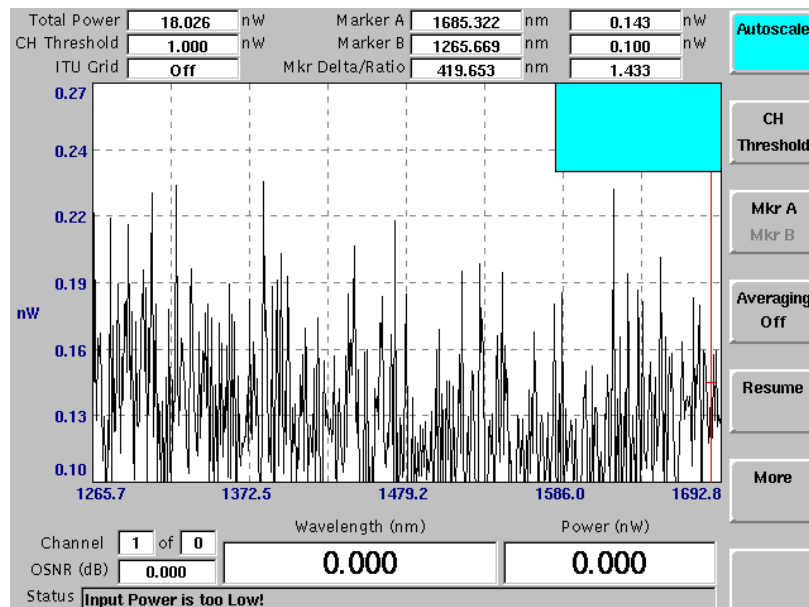
6.4. Dělič SFT-S035-1x04-25-CM3-SPC-SPC

Výkon zdroje LS1-CAL (vstupní výkon) zůstal i v tomto případě stejný jako při ostatních měřeních, viz obrázek č. 29. Výkon mezi větvemi 12 je zobrazen na následujícím obrázku č. 43.



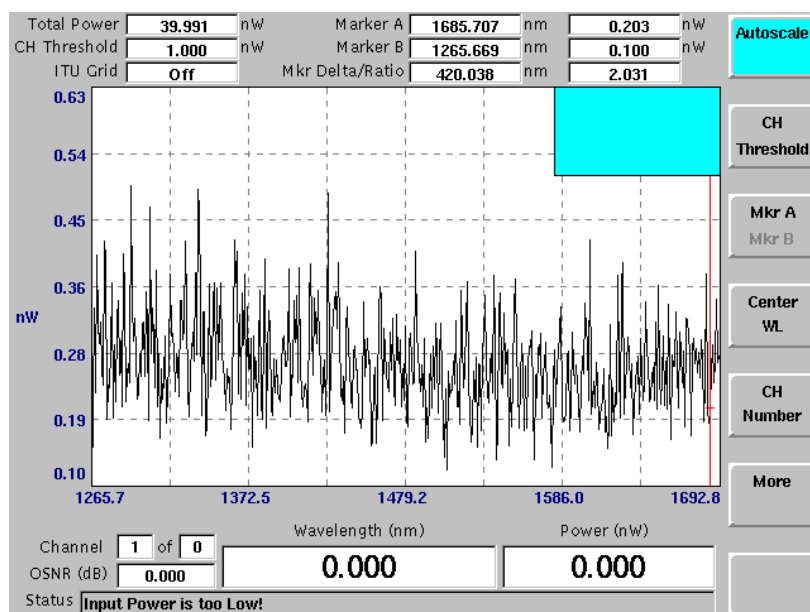
Obrázek 43: Výkon mezi větvemi 12 čtvrtého děliče (4x25)

Výkon mezi větvemi 13:



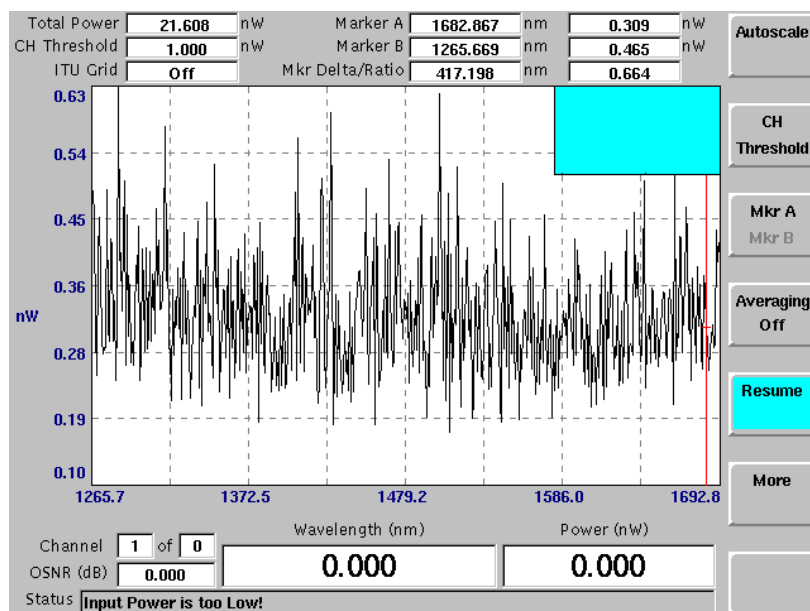
Obrázek 44: Výkon mezi větvemi 13 čtvrtého děliče (4x25)

Výkon mezi větvemi 14:



Obrázek 45: Výkon mezi větvemi 14 čtvrtého děliče (4x25)

Výkon mezi větvemi 15:



Obrázek 46: Výkon mezi větvemi 15 čtvrtého děliče (4x25)

Výkony mezi větvemi 21, 31, 41, 51 resp. měření z opačného směru uvádím v tabulce 5. Výstupní výkony mezi větvemi 2, 3, 4, 5 nebylo stejně jako u předchozích děličů možné změřit, protože je mezi nimi velmi vysoký útlum (ilustrace obrázek č. 34).

Naměřené a vypočítané hodnoty (vstupní výkon $P_{IN} = 275,479\text{nW}$):

Mezi větvemi	Naměřený výkon [nW]	CR [%]	IL [dB]	EL [dB]	U [dB]
12	11,153	12,28602	13,92697	4,821079	5,544
13	18,026	19,85723	11,84189	4,821079	5,544
14	39,991	44,05363	8,381262	4,821079	5,544
15	21,608	23,80312	11,05474	4,821079	5,544
21	12,645	14,03768	13,3817	4,854649	5,036
31	16,553	18,37609	12,21212	4,854649	5,036
41	40,322	44,76293	8,345464	4,854649	5,036
51	20,559	22,8233	11,27087	4,854649	5,036

Tabulka č. 5: Naměřené a vypočítané hodnoty pro čtvrtý dělič (4x25)

6.4.1. Zhodnocení děliče SFT-S035-1x04-25-CM3-SPC-SPC

Ve výše uvedené tabulce č. 5 můžeme vidět vazební poměr v jednotlivých výstupech. V každé větvi by mělo být 25 % vstupního výkonu. Což jak vidíme, není v tomto případě pravda. Ve výstupu 4 je navázáno nejvíce 44 % pro oba směry měření. Naopak nejméně je ve výstupu 2 cca 12%. Zbývající dva výstupy 3 a 5 se nejvíce blíží požadovaným 25 %. Vložné ztráty by měli být pro každý výstup 7,3 dB. Této hodnotě se nejvíce blížil výstup 4 s 8,3 dB. Největší rozdíl byl pochopitelně na výstupu 2, kde byla nejvyšší hodnota cca 14 dB. Celkové ztráty výrobce v katalogovém listu neuvádí (viz příloha 2), ale jejich hodnota byla cca 5 dB. Homogenita ztrát by dle výrobce měla být 1 dB, zjištěná hodnota se však pohybovala kolem 5 dB v závislosti na směru měření. Ve směru 12 a 13 byla homogenita o cca 0,5 dB vyšší než v opačném směru. Hodnoty tedy vyšly jinak, než jak udává výrobce. Je to způsobené měřením celkových výkonů na velkém rozsahu vlnových délek. Na některých vlnových délkách totiž dochází k nedokonalému navázání světla a tím ke zvýšení celkových i dalších ztrát.

7. Závěr

V úvodní části této práce jsem nastínil základy optických komunikací, historii a jejich budoucí směřování. Následuje druhá část, která obsahuje charakteristiku optických vazebních členů, jednotlivé typy a detailní popis základních parametrů.

Ve třetí části se zabývám teoretickým popisem principu činnosti vláknově optických děličů pro WDM. Zde jsem uvedl příklad výpočtu délky vazební oblasti pro vlnové délky 1300 a 1550 nm a popsal technologii výroby FBT.

Čtvrtá část popisuje realizaci měřících sestav pro měření základních parametrů vláknově optických děličů. Nejprve jsem se zabýval využitím monochromátoru pro tato měření. Ukázalo se však, že není k dispozici potřebný hardware a pro měření spektrálních charakteristik jsem tedy použil spektrometr a měřič vlnových délek. Při měření pomocí měřiče vlnových délek jsem zjistil, že tato metoda je vhodná pro měření celkových hodnot, ale pro přesné spektrální měření musíme použít stabilnější zdroj. Měření pomocí monochromátoru se však jeví jako velice efektivní a elegantní řešení pro měření spektrálních charakteristik. Z tohoto důvodu jsem navrhnul potřebné komponenty pro možné budoucí použití a uvedl je na začátek čtvrté kapitoly.

Hlavním cílem bylo zjistit, jakým způsobem se chovají vláknově optické děliče pro jiné vlnové délky, než uvádí výrobce. Naměřené a vypočítané spektrální charakteristiky jasně ukazují značné rozdíly ve vazebním poměru, vložných ztrátách, celkových ztrátách a homogenitě, použijeme-li různé vlnové délky. Zhodnocení jednotlivých naměřených a vypočítaných parametrů, spolu s přehlednými grafy jsem uvedl do příslušných podkapitol.

Z výsledných spektrálních charakteristik lze snadno zjistit, zda je možné měřené děliče použít pro danou vlnovou délku. Samozřejmě je pak na našem rozhodnutí a konkrétním případě jestli je jejich použití pro zamýšlenou vlnovou délku vhodné či nikoliv.

Tato práce podle mého názoru poskytuje dostatek potřebných informací, zaměřených na problematiku vláknově optických děličů. V neposlední řadě může posloužit jako inspirace nebo předloha pro eventuální budoucí měření a posuzování vhodnosti použití děličů v různých aplikacích.

Literatura

- [1] Hecht, Jeff. *City of Light, The Story of Fiber Optics*. New York: Oxford University Press. 1999. 114 s. ISBN 0195108183.
- [2] Press Release - *Nobel Prize in Physics 2009*". The Nobel Foundation.
URL < http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/press.html. 2009-10-07>
- [3] General Electric Company 1971-1985 Continuing the Tradition. *GE Innovation Timeline*.
URL < <http://www.ge.com/innovation/timeline/index.html>. 2008-10-22>
- [4] GHATAK, A. - THYAGARAJAN, K.: *Introduction to fiber optics*. New York: Cambridge. University Press 1998. 562 s. ISBN 0-521-57785-3.
- [5] CRISP, J: *Introduction to Fiber Optics. 2nd edition*. LONDON: Newnes, 2001. 227 s. ISBN 0750650303.
- [6] CI-JUN, SHUAI ; JI-AN, DUAN ; JUE, ZHONG . *Effect of technological parameters on optical performance of fiber coupler*. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, China: SPRINGER, 2007. 3 s. Dostupné z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/k38j741r6356m244/>>.
- [7] AMPHENOL FIBER OPTIC PRODUCTS: *Couplers/Splitters fiber optic catalog*. Katalogový list: 9/01, 2001. URL <www.amphenol-fiberoptics.com>
- [8] Vašínek, V.: *Přednášky 12-13, OPTOELEKTRONIKA III*. VŠB-TUO, 2010.
- [9] SEIMETZ, Matthias. *Single Fibre Bidirectional Transmission for Optical Access Networks Conventional Techniques and Novel Alternatives*. MUSE WORKSHOP. Germany, Berlin: Fraunhofer-Institute for Telecommunications Heinrich-Hertz-Institute, 2005. 28 s.

- [10] TECHNICAL SUPPORT: DWDM. BaySpec, Inc., 1999-2010. Dostupné z WWW: <http://www.bayspec.com/content.php?c_id=43>.
- [11] ŠÍMA, Jaromír. *Technologie CWDM v optických sítích: Sborník abstraktů konference Vysokorychlostní sítě 2004*. Praha: Pasnet, 2004. 59 s. URL <<http://vrs.pasnet.cz>>.
- [12] Alcatel-Lucent Bell Labs announces new optical transmission record and breaks 100 Petabit per second kilometer barrier. *Press Releases* [online]. 28.september 2009. URL <http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal/newsreleases/detail?LMSG_CABINET=Docs_and_Resource_Ctr&LMSG_CONTENT_FILE=News_Releases_2009/News_Article_001797.xm>.
- [13] SAFIBRA s.r.o.: *Manuál ke spektrometru Red Tide - princip funkce spektrometru*. 13. 2. 2008. URL <http://www.safibra.cz/cesky/produkty/spektrometry.html>
- [14] Ocean Optics. *Red Tide USB650 Fiber Optic Spectrometer : Installation and Operation Manual*. Document Number 170-00000-RT-02-1106. USA: Ocean Optics, Inc., 2001-2006 . 26 s. URL <<http://www.oceanoptics.com/Products/usb650.asp>>.
- [15] EXFO ELECTRO-OPTICAL ENGINEERING INC. *WA-7600/7100 Wavemeter*. Katalogový list: SPWA7600/7100.3AN. CANADA: EXFO Electro-Optical Engineering Inc., 2006. 2 s. URL <www.EXFO.com>
- [16] ATG's Communications & Networking Technology Guide Series: *Dense Wavelength Division Multiplexing*. The Applied Technologies Group. Linthicum, MD. CIENA Corporation, 1997. 30 s.
- [17] SÝKORA, J. *Princip WDM : Přehled principů vlnového multiplexu u optických přenosových systémů a rozbor komponent optického přenosového řetězce*. České vysoké učení technické v Praze, FEL, 2004. URL <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072805>>.
- [18] PETERKA, P. *Vláknové lasery - jasné světlo ze skleněných nitek*. Ústav radiotechniky a elektroniky, Akademie věd ČR

-
- [19] LU, Hai-Han. *Fiber to the Classrooms: Internet over fiber optical CATV system*. Department of Photonics, National Taipei University of Technology, Taipei, 10626, Taiwan, Republic of China: OPTICAL REVIEW Vol. 9, No. I, 2001. 4 s.
- [20] HILL, Kenneth O., et al. *United States Patent: Simplified WDM fused fiber coupler design*. CANADA: Minister of communication, 1992. Patent number 5,150,439, s. 8. Dostupné z WWW: <<http://www.patentstorm.us>>.
- [21] MCATAMNEY, C., et al. *Reproducible Method for Fabricating Fused Biconical Tapered Couplers Using a CO₂ Laser Based Process*. National Centre for Laser Applications, National University of Ireland, Galway, Ireland: Proceedings of the Third International WLT - Conference on Lasers in Manufacturing, Munich, 2005. 5 s.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Základní schéma slučovače a děliče.....	6
Obrázek 2: Základní schéma optického vazebního členu NxN	7
Obrázek 3: Způsob větvení vazebních členů pro získání nestandardního typu	7
Obrázek 4: Základní schéma optického vazebního členu 2x2	9
Obrázek 5: Celkové ztráty.....	10
Obrázek 6: Vložné ztráty	10
Obrázek 7: Směrovost.....	11
Obrázek 8: Homogenita ztrát (uniformity).....	12
Obrázek 9: Útlum zpětného odrazu (return loss)	13
Obrázek 10: Izolace – spektrální přeslech.....	14
Obrázek 11: Přenos signálu po jednom optickém vláknu	16
Obrázek 12: CWDM Kanály podle ITU - T G. 694. 2 [11].....	18
Obrázek č. 13: Výkon ve výstupních vláknech v závislosti na hodnotě k_z [4].....	21
Obrázek č. 14: Zobrazení hustoty výkonu v jednotlivých výstupech [4].....	21
Obrázek 15: Vláknový vazební člen jako WDM demultiplexer	24
Obrázek 16: FBT vazební člen jako WDM demultiplexer	29
Obrázek 17: Dvě vlákna při výrobě vazebního členu FBT [4]	30
Obrázek 18: Blokové schéma procesu výroby FBT vazebních členů [6]	30
Obrázek 19: Přenos N kanálů současně po jednom vlákne.....	33
Obrázek 20: Spektrometr Red Tide (USB 650) [14].....	35
Obrázek 21: Sestava pro měření vláknových děličů 1. část.....	36
Obrázek 22: Měřič vlnových délek EXFO WA-7600 [15]	36
Obrázek 23: Sestava pro měření vláknových děličů 2. část.....	37
Obrázek 24: Blokové schéma měřeného SFT-1x2 děliče [příloha 1]	38
Obrázek 25: Blokové schéma měřeného SFT-1x4 děliče [příloha 2]	39
Obrázek 26: Blokové schéma rozdělení výkonů SFT-1x2 děliče	41
Obrázek 27: Blokové schéma rozdělení výkonů SFT-1x2 děliče	48
Obrázek 28: Blokové schéma rozdělení výkonů SFT-1x2 děliče	53
Obrázek 29: Vstupní výkon LS1-CAL	66
Obrázek 30: Výkon mezi větvemi 12 prvního děliče (50/50).....	66

Obrázek 31: Výkon mezi větvemi 13 prvního děliče (50/50)	67
Obrázek 32: Výkon mezi větvemi 21 prvního děliče (50/50)	67
Obrázek 33: Výkon mezi větvemi 31 prvního děliče (50/50)	68
Obrázek 34: Výkon mezi větvemi 23 a 32 prvního děliče (50/50)	68
Obrázek 35: Výkon mezi větvemi 12 druhého děliče (30/70)	70
Obrázek 36: Výkon mezi větvemi 13 druhého děliče (30/70)	70
Obrázek 37: Výkon mezi větvemi 21 druhého děliče (30/70)	71
Obrázek 38: Výkon mezi větvemi 31 druhého děliče (30/70)	71
Obrázek 39: Výkon mezi větvemi 12 třetího děliče (10/90)	73
Obrázek 40: Výkon mezi větvemi 13 třetího děliče (10/90)	73
Obrázek 41: Výkon mezi větvemi 31 třetího děliče (10/90)	74
Obrázek 42: Výkon mezi větvemi 12, při použití zdroje OLS2 (dělič 10/90)	75
Obrázek 43: Výkon mezi větvemi 12 čtvrtého děliče (4x25)	76
Obrázek 44: Výkon mezi větvemi 13 čtvrtého děliče (4x25)	76
Obrázek 45: Výkon mezi větvemi 14 čtvrtého děliče (4x25)	77
Obrázek 46: Výkon mezi větvemi 15 čtvrtého děliče (4x25)	77

Seznam příloh

- Příloha 1: Katalogový list firmy Optokon: Singlemode couplers (SFT-S35-01x02)
- Příloha 2: Katalogový list firmy Optokon: Singlemode couplers (SFT-S35-01xN)
- Příloha 3: Coupler test report - SFT-S035-1x04-25-CM3-SPC-SPC
- Příloha 4: Coupler test report - SFT-S035-1x02-10-CM1-SPC-SPC
- Příloha 5: SFT-S035-1x02-50-CM1-SPC-SPC
- Příloha 6: SFT-S035-1x02-30-CM1-SPC-SPC
- Příloha 7: SFT-S035-1x02-10-CM1-SPC-SPC
- Příloha 8: SFT-S035-1x04-25-CM3-SPC-SPC
- Příloha 9: Katalogový list firmy Opto-Link Corporation Ltd. Multimode Couplers
- Příloha 10: Katalogový list firmy Opto-Link Corporation Ltd. Singlemode Couplers
- Příloha 11: Accessories for Monochromators. LOT-Oriel Group Europe.
- Příloha 12: Fiber Bundles – Circular to Rectangular. LOT-Oriel Group Europe.
- Příloha 13: Foto kalibrovaný zdroj LS-1-CAL na vstupu monochromátoru se dvěma objektivy
- Příloha 14: Foto kalibrovaný zdroj LS-1-CAL s kolimátorem a adaptérem SMA-FC
- Příloha 15: ITU-T- Standard G. 694.1
- Příloha 16: Monochromator/Spectrograph Omni-l 150. LOT-Oriel Group Europe.
- Příloha 17: Popis funkce MUX/DEMUX (optické filtry, AWG, FBG)
- Příloha 18_a,b: Porovnání výstupních výkonů a vložných ztrát ze směru 12 a 21.

Většina příloh jsou fotografie nebo podrobné katalogové listy dodávané výrobcem. Jelikož obsahují příliš velký počet stran, rozhodl jsem se, je po dohodě s vedoucím uložit pouze na přiložené CD, spolu s celou diplomovou prací. Pouze přílohy 18_a,b jsem připojil v tištěné formě do příloh na konci. Přílohy jsem umístil do adresáře /Přílohy/. Každou přílohu jsem uložil do příslušného podadresáře například (/Přílohy/Příloha 1). Všechna zdrojová naměřená data pro grafy a výpočty jsem uložil do adresáře „Zdrojová Data“.